



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

SPALOVÁNÍ PELET Z KÁVY

COMBUSTION OF COFFEE PELLETS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Andrea Kurečková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Lisý, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Andrea Kurečková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Lisý, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Spalování pelet z kávy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zaměřena na stanovení podmínek spalování alternativních biomasových pelet, zejména stanovení optimálních spalovacích podmínek pro kávové pelety a vyhodnocení emisních parametrů kávových pelet.

Cíle bakalářské práce:

- Zpracovat rešerši energetických vlastností pelet z kávy.
- Provést základní spalovací zkoušky.
- Porovnat výsledky se spalováním čistých dřevěných pelet.

Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 9788021447707.

PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. Biomasa: obnovitelný zdroj energie. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5.

MALATĚK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá spalováním kávových pelet, které jsou vyrobeny z kávové sedliny. Práce se dělí na dvě hlavní části. První část obsahuje rešerši o spalování, tuhých palivech a energetickém využití kávové sedliny. Druhá část je experimentální a popisuje spalovací zkoušku. Je zde popsán postup měření, potřebné výpočty a vyhodnocení.

KLÍČOVÁ SLOVA

kávová sedlina, spalovací zkouška, biopalivo

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with combustion of coffee pellets, which are made of spend coffee grounds. The work is divided into two main parts. The first part contains a research of combustion, solid fuels and energy use of spent coffee grounds. The second part is experimental and describes the combustion test. It describes the measurement procedure, the necessary calculations and evaluation.

KEY WORDS

Spent coffee grounds, combustion test, biofuel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUREČKOVÁ, A. *Spalování pelet z kávy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martina Lisého, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Andrea Kurečková

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala Ing. Martinu Lisému, Ph.D. za jeho čas, ochotu, věcné připomínky konzultacích a cenné rady při vypracování mé bakalářské práce. Rovněž bych chtěla poděkovat panu Ing. Otakaru Štelcovi za vstřícnost a pomoc při měření.

OBSAH

1	Úvod.....	15
2	Spalování.....	16
2.1	Hoření	16
2.1.1	Okysličovadlo	16
2.1.2	Palivo	17
2.2	Statika spalování	17
2.2.1	Dokonalé spalování	17
2.2.2	Nedokonalé spalování.....	17
2.2.3	Spalování za přebytku vzduchu	18
2.3	Dynamika spalování	18
2.3.1	Spalování kinetické	19
2.3.2	Spalování difúzní.....	20
3	Palivo.....	21
3.1	Vlastnosti paliv	22
3.1.1	Obsah vody	22
3.1.2	Spalné teplo a výhřevnost.....	22
3.1.3	Popelovina v palivu	23
3.1.4	Hořlavina paliva	24
3.2	Biopaliva	24
4	Káva	26
4.1	Využití	26
4.2	Energetické využití	27
4.3	TGA	27
5	Spalovací zkouška	29
5.1	Použité přístroje	30
5.2	Postup měření	32
6	Závěr.....	50
	Seznam použitých zdrojů.....	51
	Seznam použitých zkratk a symbolů	53

1 Úvod

Informace o alternativních zdrojích energie se v současné době stávají častým tématem diskuze. Důvodem je snižující se zásoba fosilních paliv, která by měla být vyčerpána v následujících letech, rychle rostoucí cena těchto paliv a stále častěji se objevující zprávy o negativním dopadu fosilních paliv na životní prostředí [18].

K alternativním palivům se řadí především biomasa, která je čtvrtým největším zdrojem energie na světě dodávající přibližně 10% primární energie. Biomasa je vlídná k životnímu prostředí a představuje mnoho technických a ekonomických výhod. Problémem biomasy pěstované pro energetické účely je, že díky ní dochází k utlačování pěstitelství klasických plodin pro zajištění obživy obyvatelstva. Mnohem lepší volbou je tedy využití zbytků biomasy (např. piliny, sláma, slupky atd.), jedná se o poměrně levný zdroj energie, který představuje ekologicky přijatelný způsob likvidace biogenních odpadů [17,18].

Mezi zbytky biomasy se řadí i kávová sedlina (v angličtině spent coffee grounds, dále jen SCG), která nemá žádnou komerční hodnotu, proto je obvykle vyhazována jako pevný odpad nebo v malé míře používána na kompostování. SCG se získává z přípravy kávového nápoje, celkové množství SCG na světě se pohybuje okolo 6 miliónu tun ročně. Kávová sedlina byla testována na výrobu energie a bylo dokázáno, že ji lze využít jako zdroj k výrobě bionafty, palivových pelet, briket a dokonce v průmyslových odvětvích i jako alternativu uhlí [16,17].



Obr. 1: Pelety z čisté kávové sedliny

2 Spalování

Spalování představuje chemický proces hoření paliva se vzdušným kyslíkem. Při tomto procesu se slučují prvky obsažené v palivu s kyslíkem, na jejichž správném poměru závisí kvalita spalování. Jedná se o nejjednodušší metodu pro termickou přeměnu organických paliv na tepelnou energii za dostatečného množství kyslíku. Látky vstupující do reakce se nazývají reagenty (t.j. palivo a okysličovadlo), na druhé straně látky vystupující jsou produkty spalování [1].

O spalování můžeme mluvit také jako o fyzikálně chemickém ději s uvolňováním tepla, kde rozeznáváme dva druhy chemických reakcí. První jsou exotermické reakce, při nichž se teplo uvolňuje a druhé jsou endotermické reakce, které potřebují přívod tepla pro svůj průběh [3].

2.1 Hoření

Chemický pochod dvou látek (paliva a okysličovadla) se nazývá elementární hoření. Tento proces probíhá s intenzivním uvolňováním tepla způsobující prudké nárázové stoupaní teploty reagující směsi. Jedná se o exotermní reakci, jejíž podstata spočívá v tom, že atomy hořlaviny doplňují své vnější elektronové obálky na plný počet elektronů [1, 2].

Hoření může začít samovolným samovznícením nebo působením tepelného impulsu. Jedná se o řetězový děj, kde část tepla slouží jako iniciátor zapálení nové směsi vstupující do reakce [3].

Výsledkem jsou vznikající plyny, které představují systém méně uspořádaných molekul než mělo předchozí palivo. Délka trvání hoření závisí na množství hořlavé směsi [2].



Obr. 2 : Vliv jednotlivých faktorů hoření [4]

2.1.1 Okysličovadlo

Okysličovadlem se rozumí jakákoliv látka, která obsahuje nebo může uvolňovat atomový kyslík (zaměříme-li se na okysličovadla kyslíkového typu). Technický význam mají pouze ta okysličovadla, kterých je při dostatečné účinnosti vzájemného působení s palivem dostatek a jsou běžně dostupná. V tomto případě nemá konkurenci atmosférický vzduch, jež nás obklopuje a pro jeho neomezenou dostupnost je využíván v technice téměř „monopolně“, i když představuje poměrně slabé okysličovadlo (obsahuje na váhu 23% volného kyslíku O_2) [2].

Oxidační pochod je doprovázen nezbytným rozbitím původní molekuly oksylichovadla, proto je třeba při výpočtu uvolňované energie neboli spalného tepla započítat i energii potřebnou k rozbíjení vazeb mezi atomy molekuly oksylichovadla.

2.1.2 Palivo

Palivem se nazývá libovolná látka, která obsahuje nebo může uvolňovat elementární hořlavou látku v atomárním stavu. Více o palivu jako takovém bude probráno v kapitole 3.

2.2 Statika spalování

U statiky spalování je spalování zkoumáno jako souhrn probíhajících chemických reakcí paliva a oksylichovadla bez ohledu na časový průběh a prostorové ohraničení. Výstupem výpočtů jsou kvantitativní parametry vstupů a výstupů spalovacího procesu [3].

Cílem výpočtů statiky spalování je získání základních údajů pro návrh spalovacího zařízení (spalovací, komora, spalinovody, ventilátory atd.). Výpočty se provádí hlavně na objem potřebného spalovacího vzduchu a na objem a složení produktů spalování neboli spalin. Spotřeba vzduchu a objem spalin se určují ze stechiometrických spalovacích rovnic hořlavých složek paliva [3].

2.2.1 Dokonalé spalování

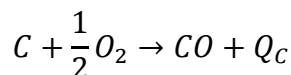
Při dokonalém spalování nevznikají zplodiny, které by byly schopné dalšího hoření. Dochází k oxidaci uhlíku na oxid uhličitý, obdobně také vodíku na vodní páru a síry na oxid siřičitý.

Platí následující stechiometrické vztahy [3]:

- spalování uhlíku na oxid uhličitý
$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + Q_C$$
- spalování vodíku na vodní páru
$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + Q_{H_2}$$
- spalování síry na oxid siřičitý
$$S + O_2 \rightarrow SO_2 + Q_S$$

2.2.2 Nedokonalé spalování

Nedokonalým spalováním rozumíme spalování, kdy nedochází k úplně oxidaci paliva až na konečné produkty, ale spaliny odcházející z prostoru spalování obsahují hořlavé složky. Produktem je oxid uhelnatý. Nedokonalé spalování je charakterizováno základním stechiometrickým vztahem [3]:



Při nedokonalém spalování se spotřebuje poloviční objem O_2 a reakce dodává méně možné energie než při dokonalém spalování, proto se v praxi nedokonalému spalování vyhýbáme [3].

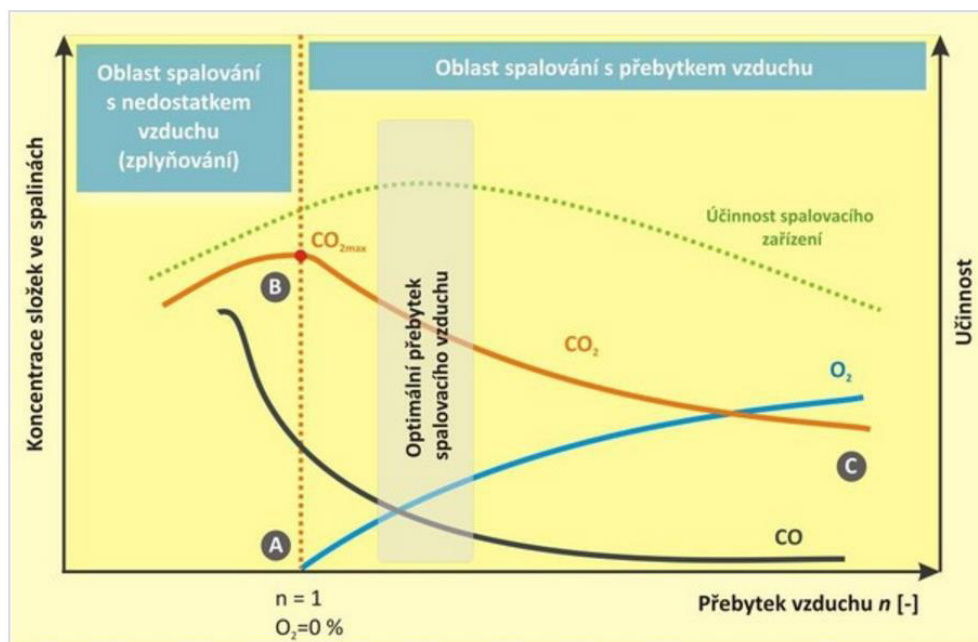
2.2.3 Spalování za přebytku vzduchu

Praktické spalování nemůže probíhat pouze s přívodem teoretického množství spalovacího vzduchu, které představuje minimální množství vzduchu potřebného k průběhu dokonalého spalování. Proto se musí do ohniště přivádět množství vzduchu větší než je teoretické množství. Toto spalování se označuje jako spalování s přebytkem vzduchu. Přbytek vzduchu je tím větší, čím hůře dochází ve spalovacím zařízení k míšení paliva a okysličovadla a čím obtížněji se palivo spaluje [3].

Pro spalování s přebytkem vzduchu je nutné zavést součinitel přebytku vzduchu α [3].

$$\alpha = \frac{V_{vz sk}}{V_{vz min}}$$

Tento poměr představuje poměr množství vzduchu do ohniště skutečně přivedeného a množství vzduchu teoreticky potřebného. Součinitel přebytku vzduchu se liší v jednotlivých místech spalínového zařízení, proto se musí vztahovat na konkrétní místo ve spalovacím zařízení [3].



Obr. 3: Vliv přebytku spalovacího vzduchu na účinnost a kvalitu spalování [5]

2.3 Dynamika spalování

Hoření paliva je složitý děj, který si lze představit jako fyzikální a chemické děje, které probíhají konečnou rychlostí. Mezi fyzikální procesy patří především směšování paliva a okysličovadla, tepelná příprava hořlavé směsi pro vzplanutí, rychlost prodělení směsi atd. Tyto děje potřebují určitý čas na svůj průběh a součet těchto časů udává celkovou dobu hoření τ_c a bude platit [1]:

$$\tau_c = \tau_f + y \cdot \tau_{ch}$$

kde τ_f ... doba průběhu fyzikálních dějů [s]
 τ_c ... doba průběhu chemických dějů [s]
 y ... součinitel vyjadřující překrytí obou dějů [-]

Pro celkovou dobu hoření může být rozhodující buď fyzikální, nebo chemická část děje. Podle toho, která část děje převládá, rozdělujeme hoření na kinetické a difúzní [1].

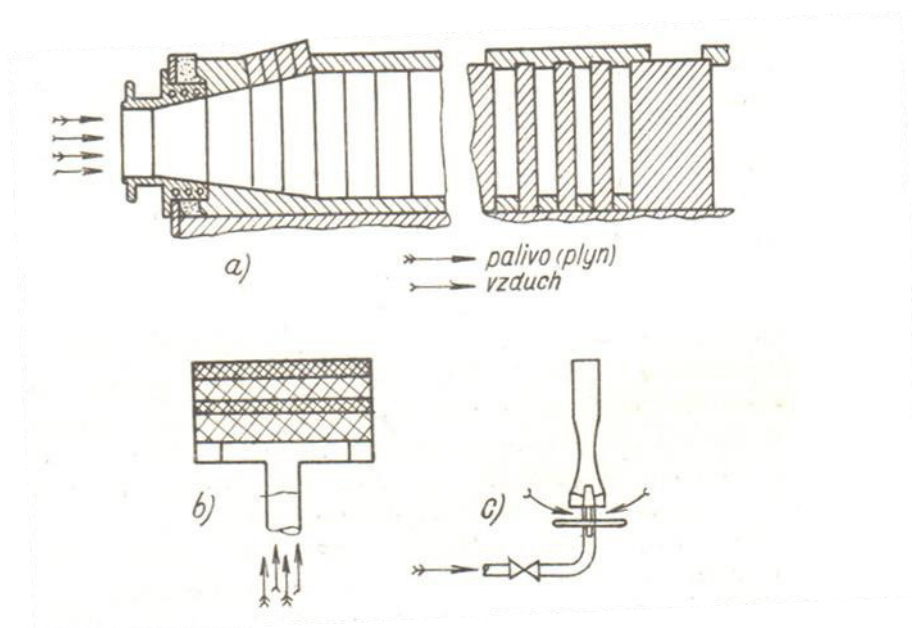
2.3.1 Spalování kinetické

Kinetické hoření probíhá tehdy, když doba fyzikální části procesu je menší než doba nutná pro průběh hoření [1].

$$\tau_f \ll \tau_{ch} \quad \text{a platí} \quad \tau_c \cong \tau_{ch}$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že celková doba hoření je určována dobou průběhu chemické reakce. Řídicími zákony budou zákony kinetiky chemických reakcí. Rozhodujícími vlastnostmi pro rychlost průběhu kinetického hoření jsou vlastnosti paliva, teplota, tlak a koncentrace reagujících látek. Typickým příkladem kinetického spalování je spalování plynného paliva, které je smíšené se vzduchem ještě před vstupem do spalovací komory [1,3].

Při použití kinetické metody se vytváří homogenní (stejnorodá) směs „palivo+vzduch“. Hoření probíhá v plynulém, homogenním prostředí za stálého přebytku vzduchu ($\alpha = \text{konst.}$) a za stálé výhřevnosti ($H = \text{konst.}$). Vytvářet stejnorodou směs takovýmto způsobem lze pro všechny druhy paliv a okysličovadel (plynných, kapalných a tuhých). Směsi plynů se vzduchem se hojně využívají v hořácích malého výkonu (např. v hořácích laboratorního typu). V průmyslu se také používají tzv. „bezplamenové“ hořáky nebo hořáky s „povrchovým spalováním“, jde o spalování hořlavé plynné směsi v pórech a kanálcích rozžhavené žárovzdorné vložky umístěné v hlavici hořáku [2].



Obr. 4: Typy hořáku pro kinetický princip spalování (a - šterbinový=tunelový hořák na kychtový plyn; b - bezplamenový hořák se zrnitým pórovitým nástavcem; c – hořák s předběžným smíšením plynu a vzduchu) [2]

2.3.2 Spalování difúzní

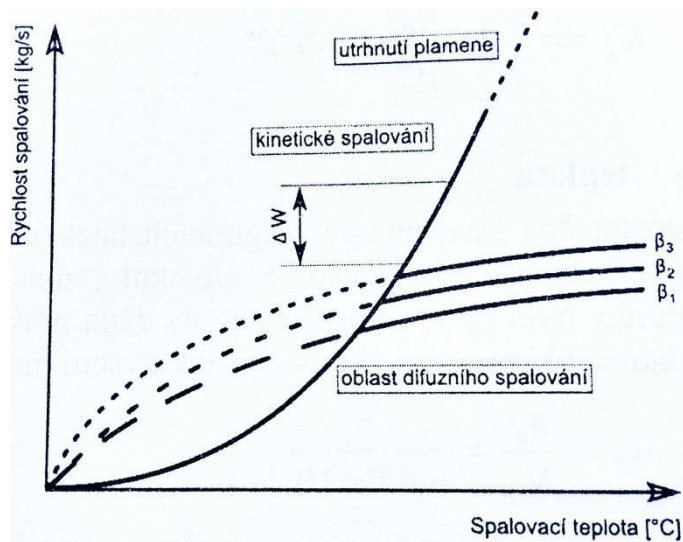
Difúzní hoření probíhá, pokud je fyzikální část časově mnohonásobně větší než čas nutný pro vlastní chemickou reakci. Platí tedy [1]:

$$\tau_f \gg \tau_{ch} \quad \text{a platí} \quad \tau_c \sim \tau_f$$

Difúzní hoření se řídí hlavně zákony výměny hmoty a zákony difuze. Proces míšení paliva s okysličovadlem určuje rychlost a kvalitu celého spalovacího procesu. Rozhodujícími faktory jsou rychlost proudění, charakter proudění paliva a vzduchu, zda se jedná o proudění laminární nebo turbulentní, tvaru a rozměru ohniště, tvar částice paliva, umístění a nasměrování hořáků apod. [1, 3].

Při tomto druhu spalování se směs spaluje ihned při svém vzniku neboli při vzájemném dotyku paliva a okysličovadla. U difúzního hoření je palivo a okysličovadlo do prostoru přiváděny odděleně, proto musí nejdříve dojít ke smíšení těchto dvou látek, poté k ohřevu hořlavé směsi, zapálení a nakonec k vlastnímu hoření [1, 2].

Skutečná rychlost chemické reakce je stejná jako rychlost tvoření směsi, jelikož rychlost chemické reakce probíhá za vysokých teplot je mnohem větší než rychlost tvoření směsi [2].



Obr. 5: Závislost kinetické a difúzní rychlosti spalování na teplotě [3]

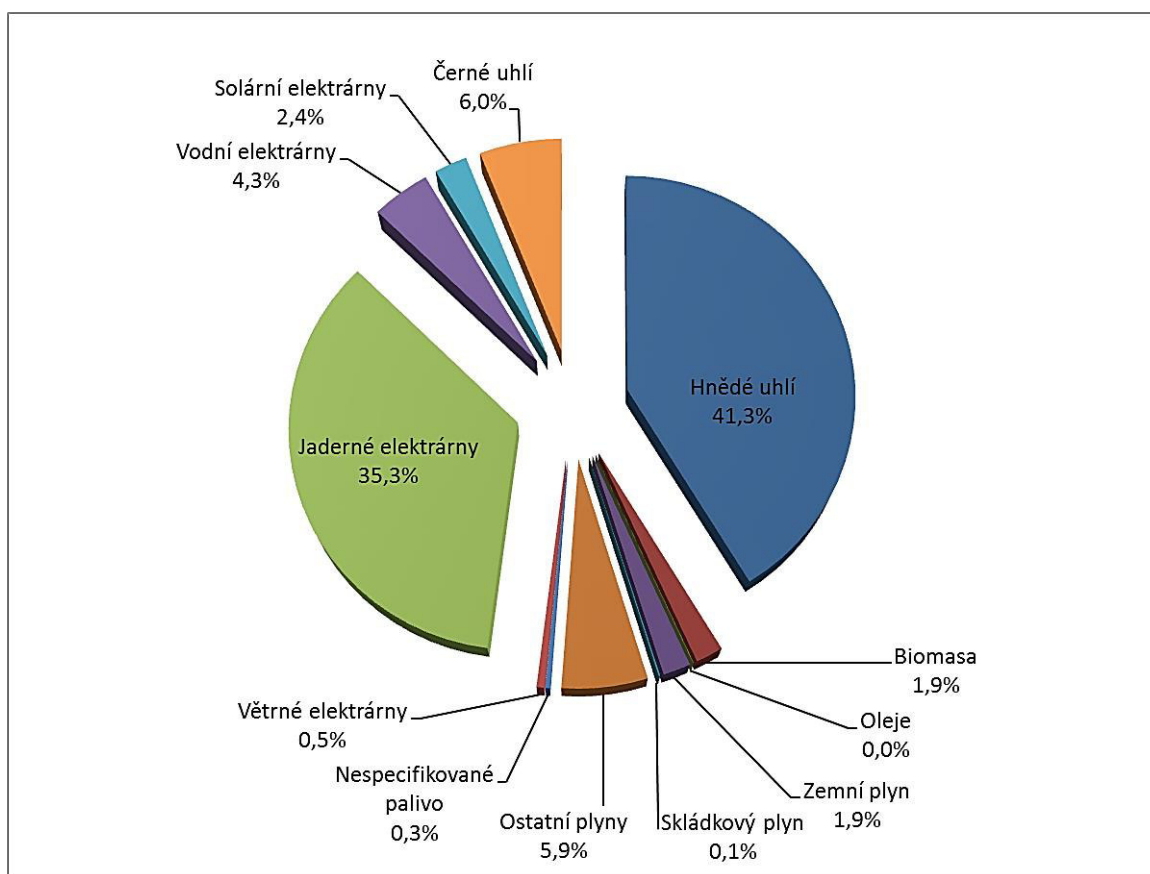
3 Palivo

Palivem se nazývá libovolná látka, která obsahuje nebo může uvolňovat elementární hořlavou látku v atomárním stavu. Všechny průmyslové druhy přírodního paliva se skládají z organických sloučenin, které obsahují značnou koncentraci uhlíku C, proto je právě uhlík nejdůležitější elementární hořlavinou, i když se dle měrného vyvíjení tepla při oxidaci nevyrovná mnoha jiným prvkům (např. některým kovům) [2].

Z technického hlediska lze za palivo pokládat libovolnou hořlavou látku, která splňuje tyto základní znaky [2]:

- dostatečně vysoký měrný výkon tepla (na jednotku váhovou)
- dostatečná schopnost začít hořet na vzduchu
- dostatečně hojný výskyt v přírodě a dostupnost k hromadnému využití

Základní rozdělení paliv jsou paliva tuhá, kapalná a plynná. Paliva je možno také rozdělit na fosilní palivo představující těžené palivo, které nelze obnovit jako jsou uhlí, ropa a zemní plyn, obnovitelné palivo, kde patří především biomasa a odpadní palivo, což jsou paliva vzniklá jako produkt lidské činnosti např. odpadní plyny, komunální a průmyslové odpady apod. [3].



Obr. 6: Výroba elektřiny podle typu paliv v ČR v roce 2013 [6]

3.1 Vlastnosti paliv

Kávodou sedlinu a pelety z ní vyrobené lze zařadit mezi biomasu, která patří do sekce tuhých paliv, proto se dále tato kapitola bude zabývat pouze vlastnostmi charakteristickými pro tuhá paliva.

Složení tuhých paliv se určuje především hrubým rozbořem, při kterém se stanoví poměrný obsah vody W^r , popeloviny A^r a hořlaviny h obsažených v palivu, kde index r označuje hmotnostní obsahy v surovém palivu. Platí vztah [3]:

$$h + A^r + W^r = 100\%$$

přimísená voda	← Surové uhlí →		
	voda W^r	popeloviny A^r	hořlavina h
přítěž (balast)		prchavý podíl	tuhý podíl
		bezvodé uhlí (sušina)	
spálením vznikne:			
vodní pára	tuhé zbytky – škvára (struska), popílek		spaliny

Obr. 7: Hrubý rozbor tuhých paliv [7]

Energetické využití biomasy jako paliva je dáno fyzikálními a chemickými vlastnostmi použité biomasy. K základním palivovým rysům biomasy patří proměnný a často vysoký obsah vody, vysoké množství prchavé hořlaviny a nízké teploty měknutí hořlaviny [8].

3.1.1 Obsah vody

Voda je obsažena v každém tuhém palivu a představuje nehořlavou složku paliva, která snižuje výhřevnost paliva a proto je v palivu nežádoucí. Obsah vody v tuhých palivem může kolísat v rozmezí 0% až 60%, u některých rašelin může obsah vody dosahovat až 90%. Vlhkost také závisí ve velké míře také na skladování paliva. Přirozený obsah vody v palivu se řídí jeho geologickým stářím, tudíž čím je palivo mladší, tím více vody obsahuje [9].

Voda z paliva odchází společně se spaliny ve formě vodní páry a zvětšuje objem spalin. Při spalování vlhkost pohlcuje část uvolněného tepla a snižuje spalovací teplotu [3].

Vlhkost je v palivu vázána různými způsoby, pro analytické stanovení má význam voda vázaná a volná, které tvoří vodu veškerou. Volnou neboli přimísenou vodu, která se do paliva dostává po těžbě lze oddělit odstředěním, odkapáváním nebo filtrací. Mezi vázanou vodu se řadí kapilárně vázaná (zbytková) voda, která se dále dělí na hrubou (součást paliva, která se odpaří volným sušením při 20°C), hydrátovou (malá část vázaná na popeloviny) a odkludovanou (chemicky vázaná na hořlavinu) vodu [3, 9].

3.1.2 Spalné teplo a výhřevnost

„Spalné teplo Q_s je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20°C, přičemž voda ve spalinách zkondenzuje tj. je v kapalně fázi.“ [3, str. 17]

Spalné teplo se určuje laboratorně v kalorimetrech, z oteplení vodní lázně kalorimetru teplem, které se uvolní spaláním vzorku a spalné teplo se vypočte podle vzorce [3]:

$$Q_s = \frac{V \cdot \Delta T}{G}$$

kde Q_s ... spalné teplo [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]
 V ... vodní hodnota kalorimetru [$\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1}$]
 G ... hmotnost paliva [kg]
 ΔT ... rozdíl teplot [K]

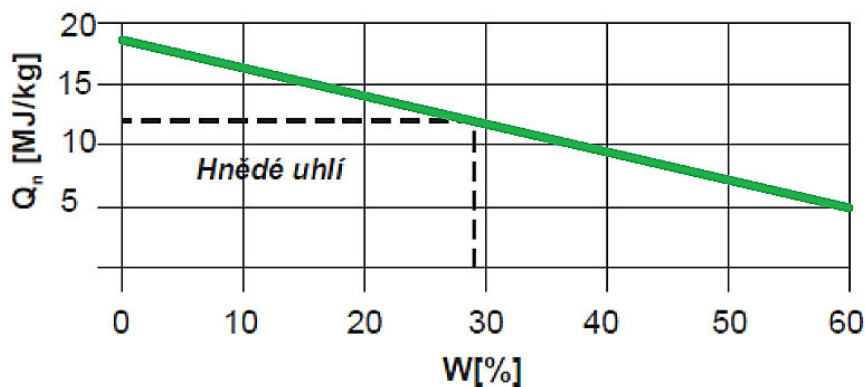
„Výhřevnost Q_i^r je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20°C , přičemž voda ve spalinách zůstane v plynné fázi.“ [3, str. 17]

Výhřevnost je jednou ze základních a určujících vlastností paliv obecně. Určuje se ze změřeného spalného tepla a je dána rovnicí [3]:

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2)$$

kde W^r ... obsah vody v palivu [-]
 r ... výparné/kondenzační teplo vody [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]
 H_2 ... obsah vodíku v surovém palivu [-]
 $8,94$... koeficient převodu vodíku na vodu [$\text{kg}_{\text{vody}}/\text{kg}_{\text{vodíku}}$]

Při spalování paliva ve spalovacích zařízeních odchází spaliny s teplotou vyšší než 100°C , voda se mění na páru, proto se využívá při tepelných výpočtech častěji výhřevnost paliva Q_i^r [9].



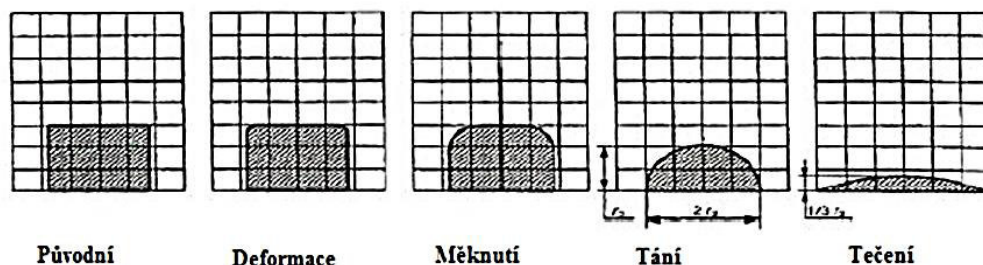
Obr. 8: Závislost výhřevnosti paliva na vlhkosti [3]

3.1.3 Popelovina v palivu

Popelovinou se označují minerální látky (křemičitany, uhličitany, sírany atd.) obsažené tuhém palivu před jeho spálením. Spálením paliva v ohništi vznikne z popeloviny tuhý zbytek, který se nazývá popel. Dalším zdrojem popele mohou být nečistoty získané během těžby, převozu a skládkování paliva [3, 9].

Popel odchází ze spalovací komory ve formě strusky, škváry nebo popílku. Struska jsou minerální zbytky paliva po jeho spálení nad teplotu vyšší než je teplota tečení popela. Škvára vzniká spalováním při teplotách, u kterých nastalo spékání a tavení to znamená, že došlo ke spojení jednotlivých zrn ve větší či menší kusy. Popílek představuje drobné minerální částice unášené spalinami [3].

K důležitým faktorům popele patří charakteristické teploty, které určují chování popele při různých teplotách. Jedná se o teplotu sintrace, měknutí t_a , tavení t_b a tečení t_c . Způsobů na určení těchto teplot je mnoho, jedním z nich je metoda založená na sledování deformace volného zkušebního tělíska (dle ČSN ISO 540). Princip metody spočívá v ohřívání válečku nebo jehlanu o hraně 3mm, který je vylišovaný ze zkoušeného popele. Pro teplotu měknutí t_a je typické ohnutí špičky jehlanu, teplota tavení t_b je dosažena, když se jehlan zhroutí v polokouli a teplota tečení t_c nastane, když se vzorek rozteče na podložce [3].



Obr. 9: Segerova metoda jehlanů[3]

3.1.4 Hořlavina paliva

Z hlediska spalovacího procesu se mezi další důležitou hodnotu řadí obsah hořlaviny v palivu. Hořlavina je část paliva, která je nositelkou tepla uvolněného spalováním. Základními prvky hořlaviny jsou uhlík, vodík, síra, kyslík a dusík [3].

Důležitou charakteristikou paliv je prchavá hořlavina, která představuje část hořlaviny uvolňující se při začátku spalování při teplotách nad 250°C. Prchavá hořlavina výrazně napomáhá vzněcování paliva v ohništi a stabilizuje spalovací proces. Obsah prchavé hořlaviny závisí na geologickém stáří paliva, čím je palivo mladší, tím více ji obsahuje [9].

Tab. 1: Vlastnosti a složení hořlavin vybraných druhů paliva [10]

Palivo	Výhřevnost paliva [MJ/kg]	Podíl prchavé hořlaviny [%]	Elementární složení				
			C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [%]
obilná sláma	14,66-17,5	70-82	40,7-48	5,4-6,4	38-43,3	0,3-0,7	0,05-0,2
řepkový olej	35	100	77	12	11	0,1	0
dřevo	16,9-21	70-85	45-52	5,3-6,5	41,4-46	0,1-1,7	0,02-0,3
hnědé uhlí	14-23	20-55	27,5-64	2,5-5,8	12,33	0,3-1,5	0,5-6
černé uhlí	27-32,5	10,40	65-84	2,8-5	5-9,1	0,9-2	0,-1,5

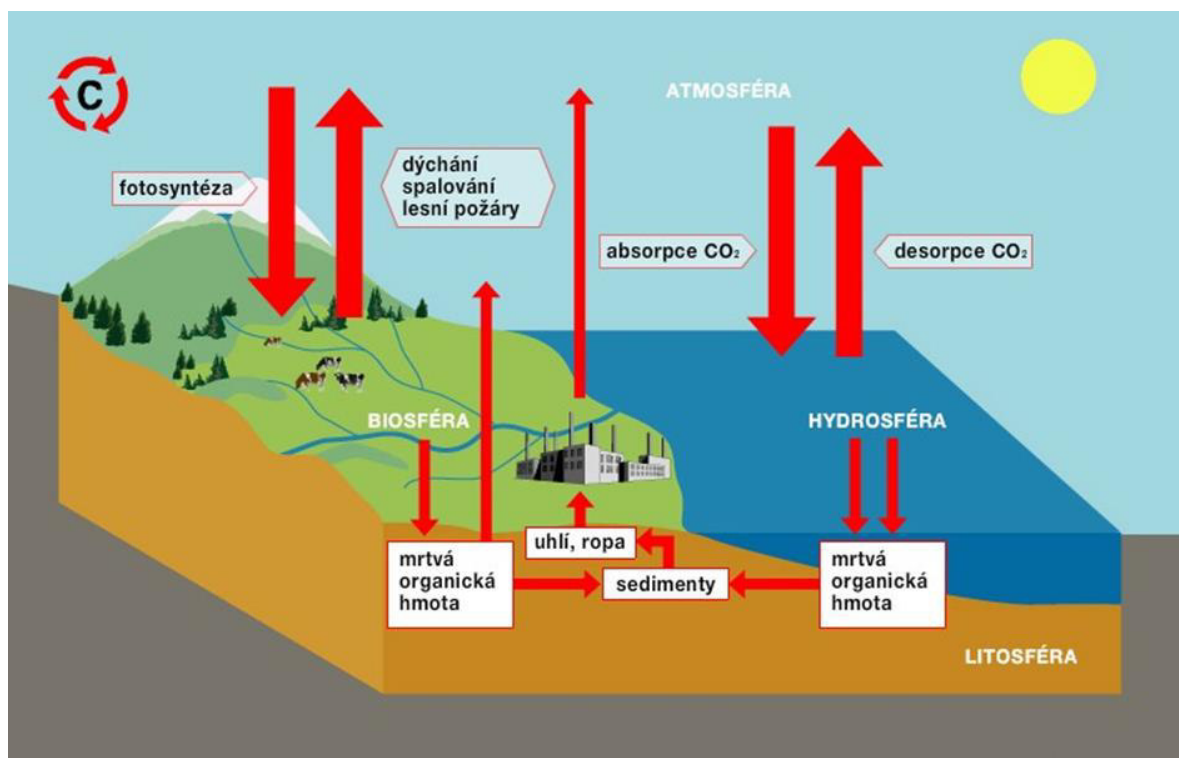
3.2 Biopaliva

Biopaliva jsou produktem, který se získává úpravou biomasy. Pojem biomasa označuje veškerou hmotu organického původu a patří mezi obnovitelné zdroje energie. Základní rozdělení je na biomasu rostlinného a živočišného původu. Rostlinná biomasa je buď záměrně získávána jako výsledek výrobní činnosti nebo se jedná o využití odpadů ze zemědělské, potravinářské a lesní výroby, z komunálního hospodářství, z údržby krajiny a péči o ni. Mezi biomasu záměrně pěstovanou k tomuto účelu řadíme řepku, šťovík, obilí, energetické dřeviny

(vrby, topoly, olše, akáty,...) atd. Pojem odpadní biomasa se užívá např. pro kukuřičnou a obilnou slámu, řepkovou slámu, zbytky z lučních a pastevních areálů, zvířecí exkrementy, zbytky krmiv atd. [3, 8].

O biopalivech se mluví především jako o „uhlíkově neutrálním“ zdroji energie. Při spalování biopaliv vzniká oxid uhličitý CO_2 z množství uhlíku obsaženého v biomase, který se prostřednictvím fotosyntézy spotřebovává na růst nových rostlin, proto biopaliva nepřispívají ke klimatické změně [11].

U rozdělení biopaliv neexistuje žádná přesná definice. Nejobvyklejším způsobem rozdělení je dle skupenství nebo dle zpracovávané suroviny. Podle skupenství se biopaliva dělí na tuhá kapalná a plynná. Mezi tuhá paliva patří dřevo v různých formách jako polena, brikety, pelety, štěpka nebo piliny, dále se zde řadí sláma, seno apod. [11, 12].

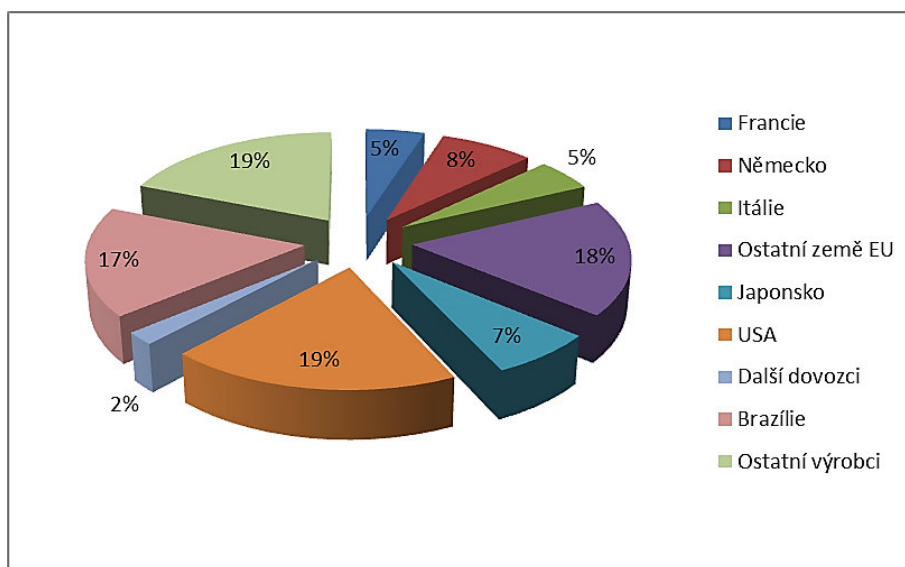


Obr. 10: Výroba a zpracování biopaliv-dynamické schéma koloběhu uhlíku [11]

4 Káva

Káva je jednou z nejvýznamnějších zemědělských plodin na světě a patří k prvním pěti globálně nejobchodovatelnějším komoditám. Běžně dostupná káva se dělí na Arabicu a Robustu, Arabica roste v nadmořských výškách vyšších než 1000m a je považována za kvalitnější díky tomu, že má jemnou chuť. Odrůda Robusta je většinou používána na výrobu instantní kávy. Podle International Coffee Organization (ICO) je každý rok po celém světě vyprodukováno přibližně 120 milionů pytlů, což odpovídá 7 milionům tun kávových zrn ročně [16].

Jedním z celosvětově nejrozšířenějších nápojů je právě káva a z její přípravy vzniká pevný zbytek neboli kávová sedlina (anglicky spent coffee grounds neboli SCG). SCG nemá žádnou obchodní hodnotu a bývá likvidován jako odpad a v malé míře využíván k dalším účelům. Tohoto odpadu se ročně vyprodukuje až 6,5 milionů tun ročně [16, 17].



Obr. 11: Celosvětová spotřeba kávy v roce 2010 [18]

4.1 Využití

V poslední době se snahou snižovat množství odpadu a chránit životní prostředí došlo k hledání různých možností, jak kávovou sedlinu využívat. Většina výzkumů byla zaměřena na přímé využití SCG než potenciálně cenné prvky z ní. První studie objevila možnost použití kávové sedliny na odstranění barviv a iontů těžkých kovů z kontaminovaných vod [16].

SCG má velmi jemnou strukturu, vysokou vlhkost (80-85%) a kyselost, je bohatá na cukry polymerizované do struktur celulózy a hemicelulózy. Vzhledem ke složení kávové sedliny existuje mnoho variant, jak ji využít. SCG se používá jako krmivo především pro přežvýkavce, prasata, slepice a králíky, bohužel dlouhodobá konzumace této plodiny způsobuje problémy močového měchýře. Dalším užitím je kompostování za účelem získání organického hnojiva. Takto získané hnojivo je bohaté na dusík, fosfor, draslík a je mírně kyselé. Kávová sedlina může být také použita k výrobě aktivního uhlí [17].

4.2 Energetické využití

Kávová sedlina byla také testována na výrobu energie. Bylo zjištěno, že olej extrahovaný z kávových zrn je velice kvalitní a byl by vhodný pro výrobu bionafty. Obsah oleje ve zdroji kávy se pohybuje od 11% do 20% v závislosti na typu. Kávový olej obsahuje vysoké množství přírodních antioxidantů a proto je velmi stabilní tj. neroztéká se velmi rychle [18].

Kávová sedlina byla také studována na obnovu fenolických sloučenin. Způsob provádění této studie je založen na použití vodného ethanolu jako rozpouštědla za mírných teplot. Na základě této studie se hodnotil energetický potenciál SCG před a po obnově fenolů. Celkový obsah fenolů se uvádí 17,75 mg GAE/g (ekvivalent kyseliny galové na gram), tato hodnota je vyšší než u ostatního zemědělského odpadu, například odpad z mrkve nebo hroznové výlisky obsahují 14mg GAE/g, kiwi 8,2 mg GAE/g a jablečné slupky obsahují 11,4 mg GAE/g. Proto na základě těchto fenolů může být SCG využitelným zdrojem pro přírodní produkci antioxidantů [16].

Tab. 2: Srovnání výhřevnosti alternativních paliv [16]

Palivo	Výhřevnost [MJ/kg]
kávová sedlina	23,72
mangové listy	19,17
olivové pecky	20,40
rýžové slupky	15,29
vinné výhonky	18,30
dubová kůra	18,30
borovicová kůra	18,30

4.3 TGA

Palivo z kávové sedliny použité pro tuto práci bylo analyzováno pomocí TGA. TGA neboli termogravimetrická analýza je jedna nejčastěji používaných metod k tepelné analýze biomasy. TGA pracuje na jiném principu než skutečné spalování v topném zařízení, ale poskytuje dostatečné informace o tepelných degradačních procesech probíhající v průběhu termochemické konverze. Cílem toho měření bylo prozkoumat pyrolýzní a spalovací charakteristiky čisté SCG, směsi se dřevem a porovnání s čistým dřevem [13].

Prvkový rozbor ukázal, že SCG obsahuje velké množství uhlíku, díky čemuž by mohla být kávová sedlina vhodná jako zdroj pro výrobu pelet. Ve srovnání s dřevní biomasou má nižší koncentraci O/C, což je způsobeno vyšší koncentrací ligninu v kávě [13].

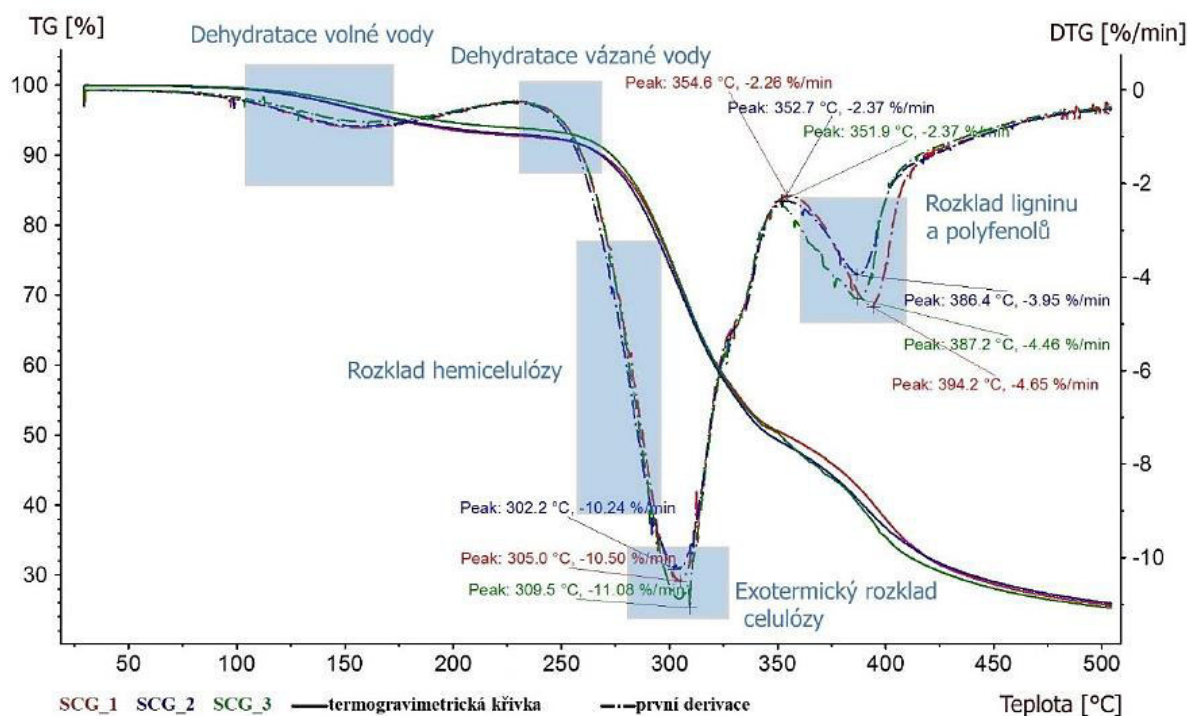
Problém se může zdát větší obsah dusíku a s ním související emisní limity. Větší zastoupení dusíku je přičítáno vysokému obsahu proteinu, proto lze předpokládat, že pro splnění emisních limitů bude třeba kávu míchat se dřevem. [17, 19]

Analýza také ukázala, že v dřevní biomase se nachází více těkavých látek než v kávě. To je způsobeno vyššímu zastoupení celulózy a hemicelulózy. V SCG je zastoupeno více stabilního uhlíku [17, 19].

Tab. 3: Chemické složení SCG [19]

Složka	Složení [%]
celulóza	8,6-13,3
hemicelulóza	30,0-40,0
proteiny	6,7-13,6
olej	10,0-20,0
lignin	33,6
polyfenol	2,5
koфеin	0,02

Analýza byla prováděna pro tři vzorky různých kávových sedlin. Experimentální TGA křivky pro všechny tři vzorky jsou zobrazeny na obrázku 12. Křivky pro kávovou sedlinu vykazují obvyklý tvar ligninocelulózových materiálů. Na základě dat z termogravimetrické analýzy lze předběžně konstatovat, že kávová sedlina vykazuje při spalování podobné vlastnosti jako dřevní biomasa, proto by měla být bez problému spalitelná. U kávy oproti dřevu dochází dříve k odpařování těkavých látek [13].



Obr. 12: graf TGA [13]



Obr. 14: Pracovní plocha v programu LabView na začátku spalovací zkoušky

5.1 Použité přístroje

Při spalovací zkoušce bylo použito mnoho zařízení, které byly ke zkoušce potřeba. Nejdůležitějším přístrojem byl kotel Verner A251. Jedná se o teplovodní kotel na spalování obnovitelných paliv (dřevních a rostlinných pelet, dřevní štěpky, obilí, atd.). Používá se k ekologickému, úspornému a komfortnímu vytápění rodinných domků, bytových jednotek, dílen a obdobných objektů [14].

Tab. 4: Vybrané parametry kotle Verner A251 [14]

Parametry kotle	
Jmenovitý výkon	25kW
Účinnost	92%
Regulovatelnost	7,5-28kW
Spotřeba paliva (při jmenovitém výkonu)	
pelety dřevní	5,8 kg/h (17,5 MJ/kg)
pelety rostlinné	6,3 kg/h (15,5 MJ/kg)
obilniny	6,8 kg/h (14,5 MJ/kg)
Hmotnost kotle	520kg
Nejvyšší provozní teplota vody	95°C
Vodní objem kotle	60l
Teplota spalin při jmenovitém výkonu kotle	160°C
Předepsaný provozní tah komína	15 kPa
Třída účinnosti	3
Emisní třída	3

Dalším důležitým přístrojem byl analyzátor spalin Ultramat Siemens 21/O2 a22/O2, který umožňuje měření CO, NO, SO₂ a O₂ aktivních v infračerveném záření metodou NDIR (nedisperzní infračervená spektrometrie). Pro analyzátor spalin je velmi důležitý tzv. vymrazovací box, do kterého vede trubička se spaliny z kotle, horký plyn putuje přes Peltiérův chladič, kde se ochladí a dojde ke kondenzaci do kádinky, dále pokračuje čistý plyn přes filtr do Ultramatu. Vymrazovací box obsahuje i kompresor, který slouží k vyvažování tlaků.

K měření úbytku paliva při spalování sloužila digitální váha Metler Toledo ICS 669. Tato hodnota slouží k výpočtu hodinové spotřeby nebo účinnosti kotle. Během měření došlo k vynulování váhy a nové načtení hodnot nebylo možné, proto nejsou k dispozici hodnoty váhy této spalovací zkoušky.

Mezi další přístroje patří digitální teploměr COMET CO301 obsahující termoelektrický článek, který je napojen na odběr z kouřovodu. Indukční průtokoměr FLOMAG 3000 s digitálním výstupem, který je napojen k PC. Tahoměr Brigon, který měří během spalovací zkoušky předepsaný tah komínu. Hodnoty z těchto přístrojů byly zaznamenávány pomocí PC.



Obr. 15: Kotel Verner A251



Obr. 17: Ultramat Siemens 21 a22



Obr. 16: Vymrazovací box

5.2 Postup měření

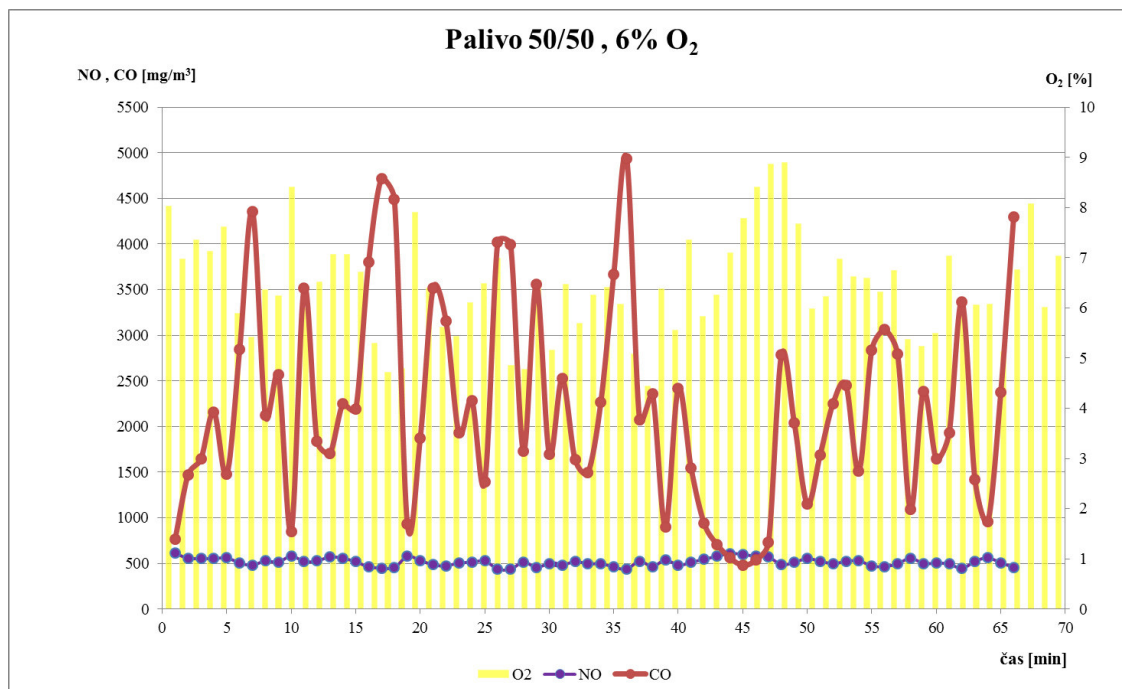
Hlavním cílem spalovací zkoušky bylo změření emisí CO, NO a tuhých znečišťujících látek TZL, které vznikají při spalování kávových pelet a dané výsledky budou porovnány s hodnotami dřevěných pelet. Zkouška probíhala postupně pro paliva: směs 50% káva/50% dřevo, 75% káva/25% dřevo a pro pelety z kávové sedliny.

Tab. 5: Parametry paliva před spalováním [13]

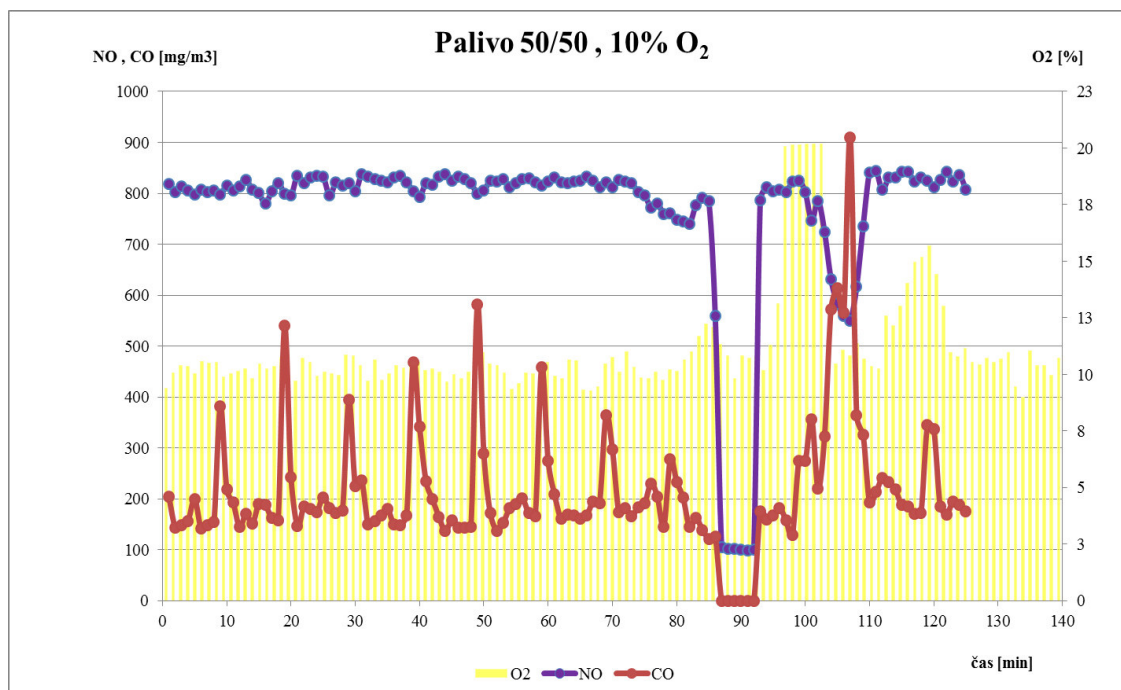
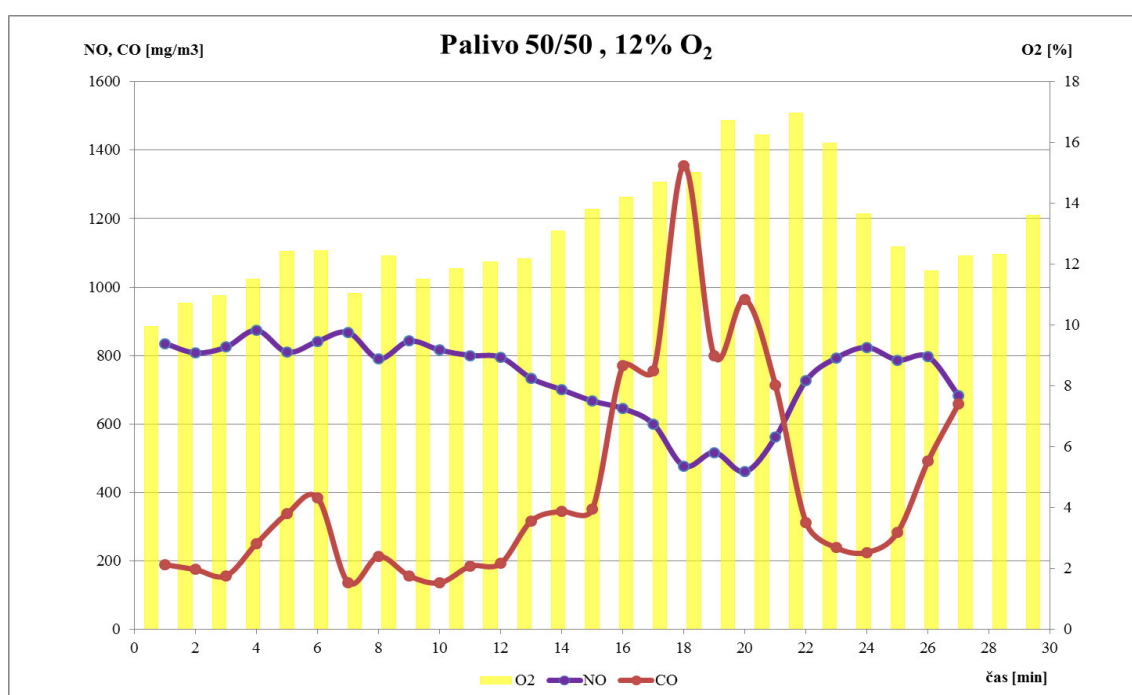
Palivo	Vlhkost [%]	Výhřevnost [MJ/kg]
50/50	8,597	18,268
75/25	8,576	19,46
káva	8,544	20,141

Spalování každého paliva bylo provedeno pro tři obsahy kyslíku O₂ a to pro přibližně pro 6%, 10% a 12%. Hodnoty pro 8% O₂ byly měřeny v rámci diplomové práce Ing. Daniela Sedláčka. Ke změnám příslušného obsahu O₂ docházelo manuálním regulováním kotle, především změnou intenzity plnění a otáčkami ventilátoru. Měření probíhalo na každé koncentraci O₂ alespoň 60 minut, poté kdy došlo k ustálení, to znamená, že nedocházelo k výraznému kolísání výkonu a tudíž i teplot spalín. Z naměřených hodnot ustálených stavů byly vyhotoveny následující grafy:

A) Pro palivovou směs 50% káva / 50% dřevo



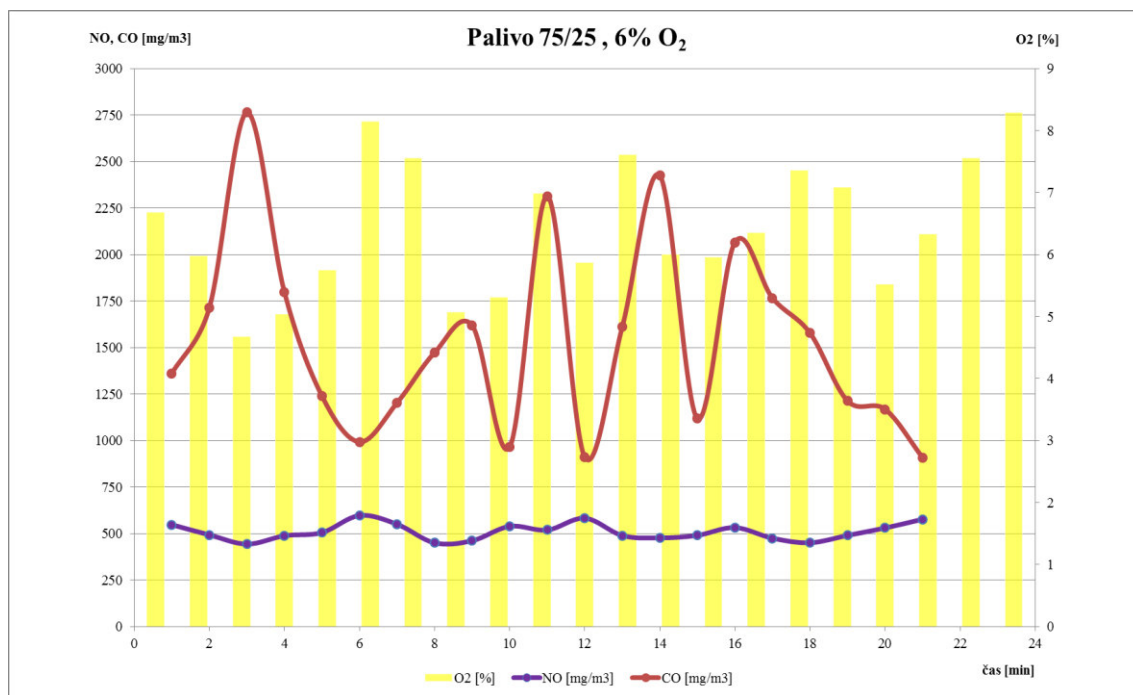
Obr. 18: Graf hodnot směsi 50/50 pro 6% O₂

Obr. 19: Graf hodnot směsi 50/50 pro 10% O₂Obr. 20: Graf hodnot směsi 50/50 pro 12% O₂

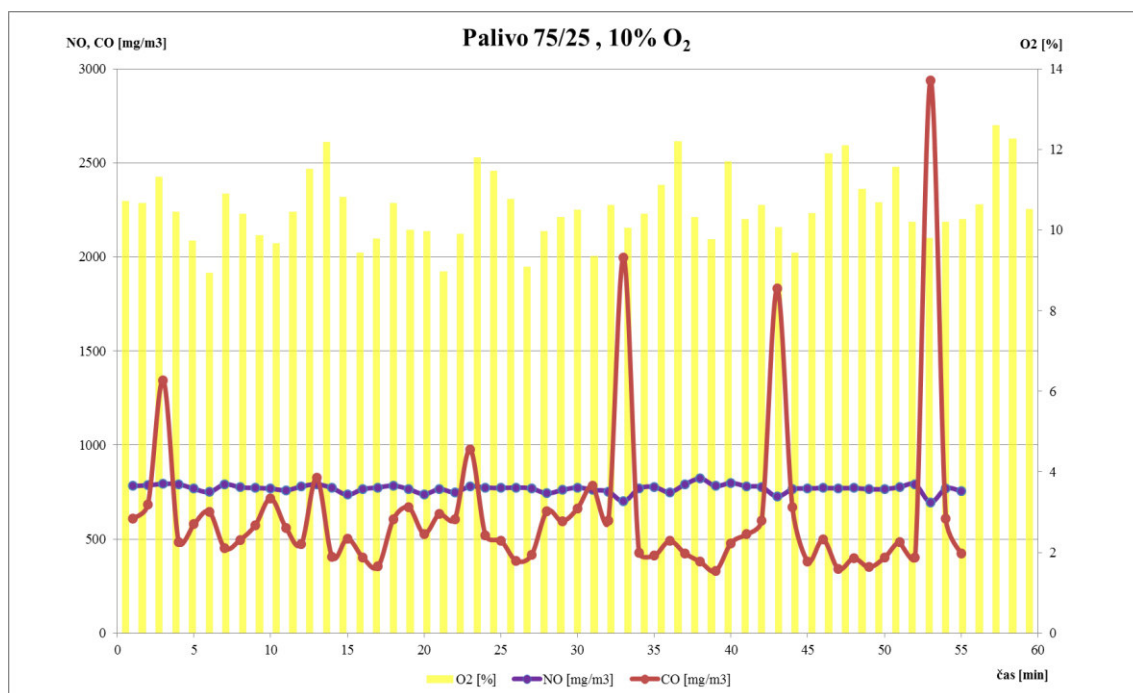
Při spalování paliva 50% káva/50% dřevo došlo k několika komplikacím. Jak je patrné z obr. 18 ustálení na hodnotě 6% kyslíku O₂ nebylo zcela uskutečnitelné, možný důvod je, že dle pokynů k používání kotle Verner je minimální množství kyslíku 10%. Ustálení hodnot při 10% O₂ proběhlo bez problémů, ale při odeběrání TZL docházelo k poškození filtrů, proto je na obr. 19 patrné 10 minutové odchýlení od ustáleného stavu, z důvodu výměny hubice TZL. Pravidelné píky patrné hlavně u spalování při 6% a 10% jsou způsobeny roštováním kotle,

které bylo nastavené na 10 minut. Z důvodu nemožnosti ustálení na 6% O₂ a dlouhé doby spalování paliva při 10% O₂ došlo k vyčerpání palivové směsi a proto měření při 12% O₂ probíhalo pouze 27 minut.

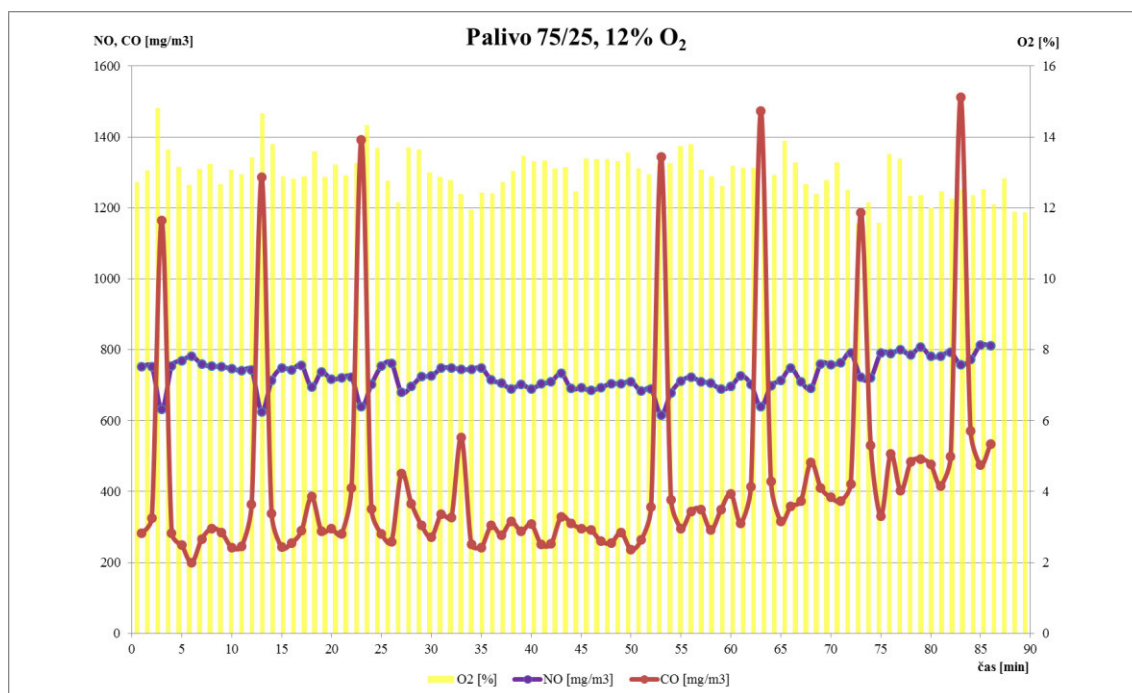
B) Pro palivovou směs 75% káva / 25% dřevo



Obr. 21: Graf hodnot směsi 75/25 pro 6% O₂



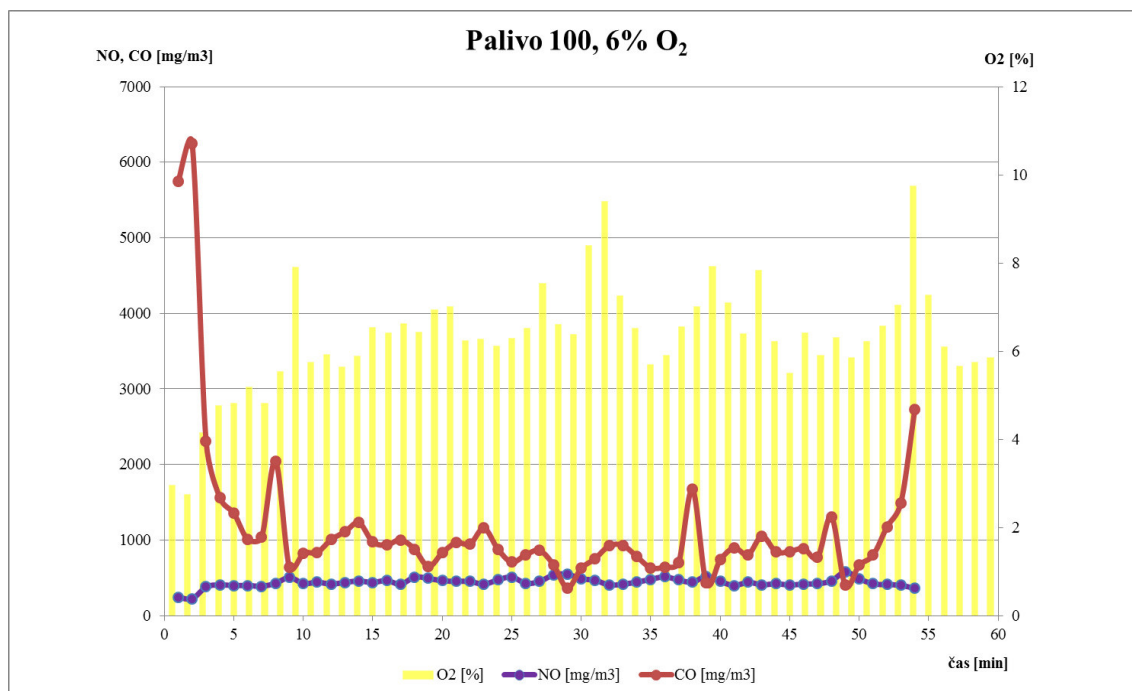
Obr. 22: Graf hodnot směsi 75/25 pro 10% O₂



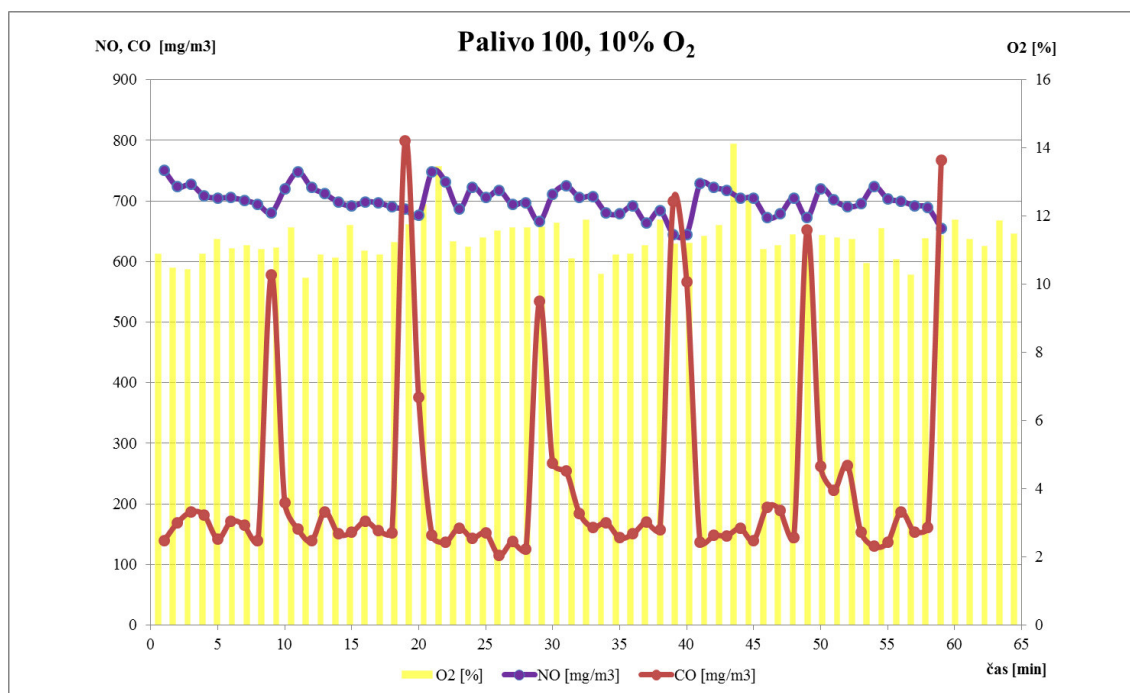
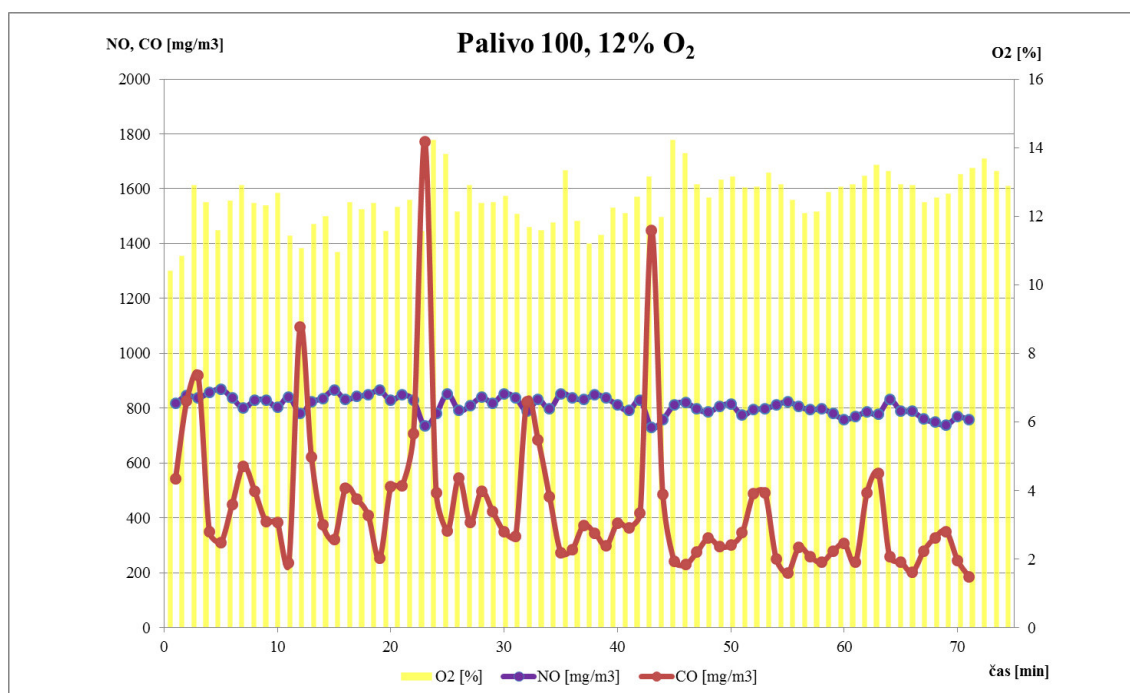
Obr. 23: Graf hodnot směsi 75/25 pro 12% O_2

U spalování paliva 75% káva/25% dřevo nedošlo k výraznějším komplikacím. Největším problémem byl nedostatek paliva při měření na poslední koncentraci kyslíku O_2 , proto jsou hodnoty z 6% zaznamenávány pouze 22 minut. Pravidelný vzrůst hodnot je způsoben roštováním kotle, které bylo nastaveno na 10 minut.

C) Pro čistou kávu



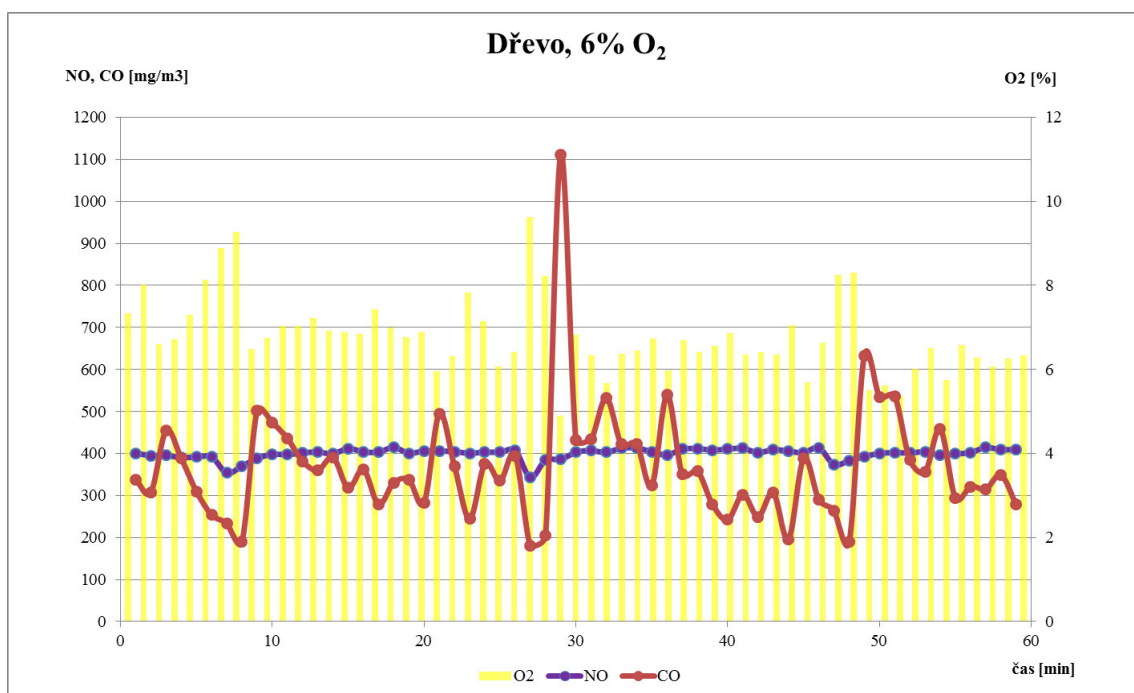
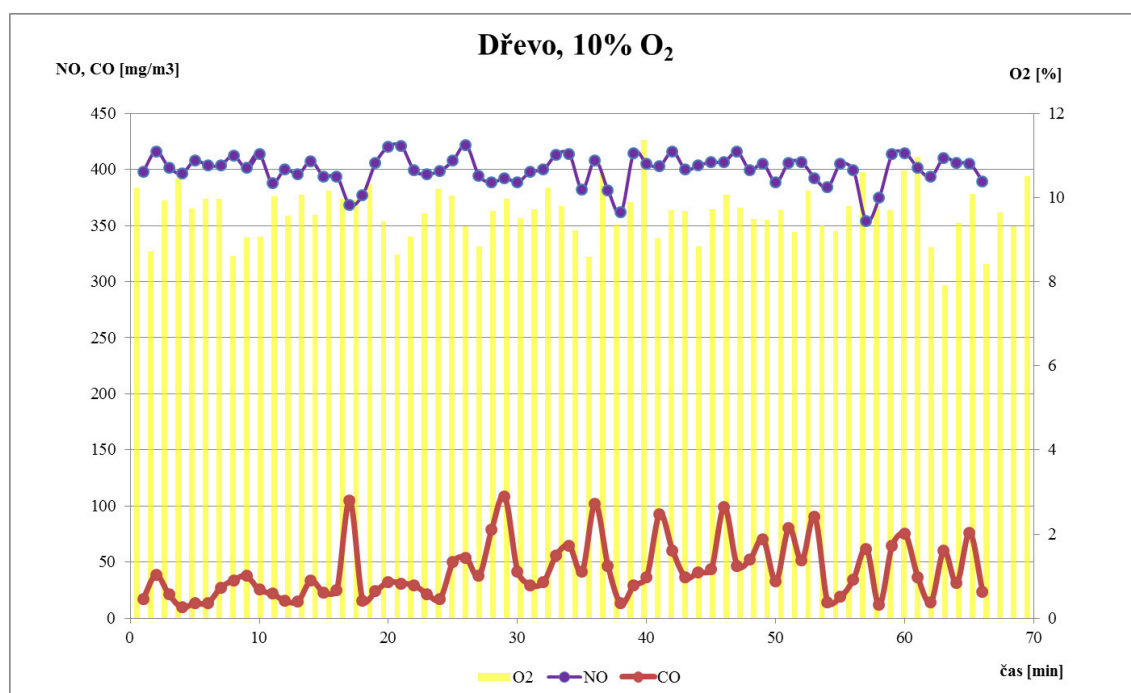
Obr. 24: Graf hodnot čisté kávy pro 6% O_2

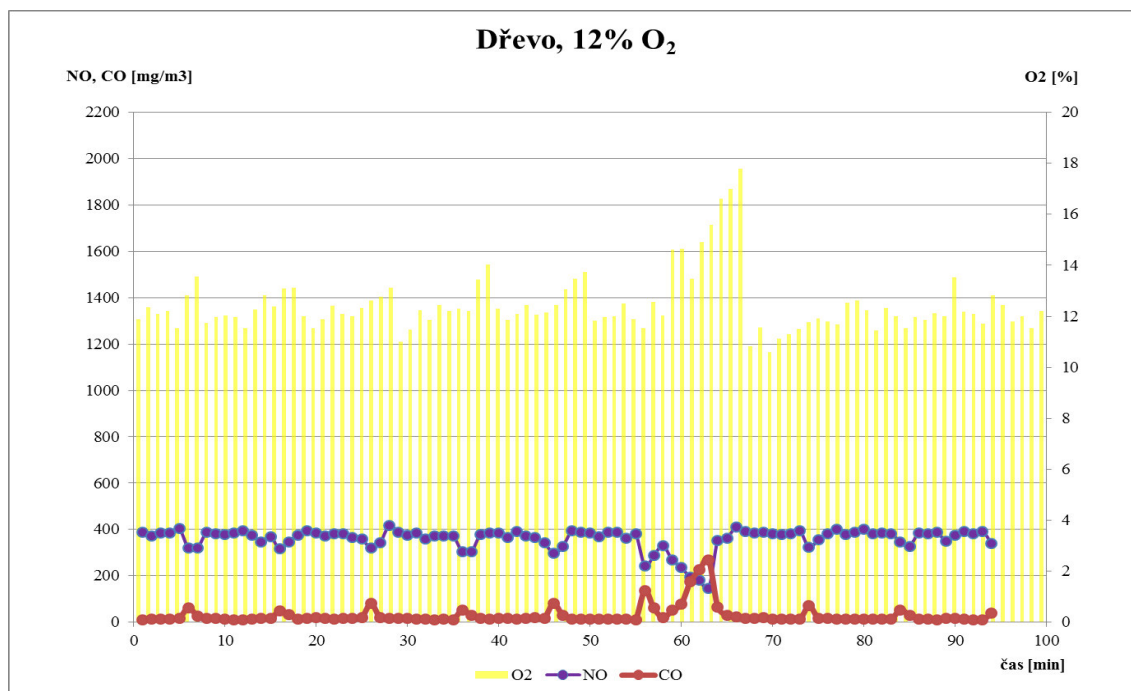
Obr. 25: Graf hodnot čisté kávy pro 10% O₂Obr. 26: Graf hodnot čisté kávy pro 12% O₂

Spalování čisté kávy probíhalo bez obtíží. Každé měření při ustálených hodnotách probíhalo nejméně 60 minut.

V rámci této bakalářské práce nebylo uskutečněno měření hodnot dřevěných pelet. Naměřená data ohledně dřevěných pelet byly použity z diplomové práce Ing. Daniela Sedláčka a z měření jiné bakalářské práce.

D) Pro dřevo

Obr. 27: Graf hodnot dřevěných pelet pro 6% O₂Obr. 28: Graf hodnot dřevěných pelet pro 10% O₂



Obr. 29: Graf hodnot dřevěných pelet pro 12% O₂

Dále byly z naměřených hodnot vypočteny referenční hodnoty koncentrace škodlivin NO a CO dle normy ČSN EN 303/5. Referenční hodnota kyslíku O₂ pro přepočet je podle dané normy 10%. Příslušný vztah na přepočet vypadá následovně [15]:

$$X_{REF} = X \cdot \frac{21 - O_{2,REF}}{21 - O_2}$$

kde X_{REF} ... referenční hodnota plynu-NO, CO [mg/m³]

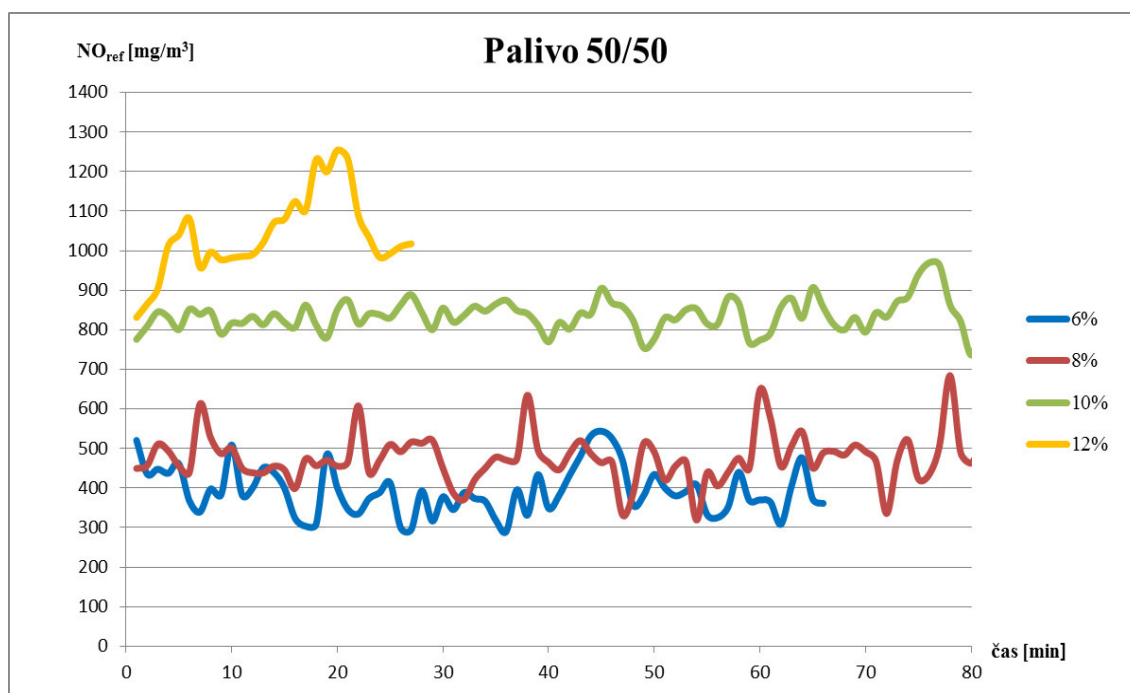
X ... hodnota plynu z měření-NO, CO [mg/m³]

$O_{2,REF}$... referenční hodnota kyslíku [%]

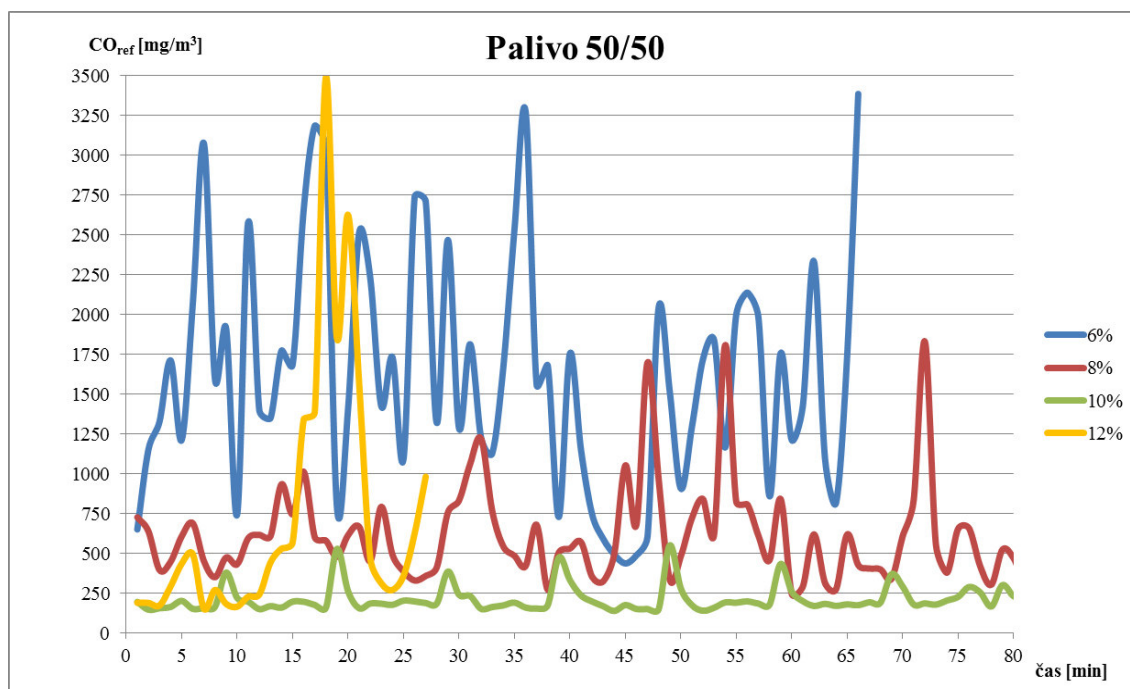
O_2 ... hodnota kyslíku z měření [%]

Referenční hodnoty jsou počítány kvůli lepšímu srovnání daných hodnot. Z přepočítaných hodnot byly pro lepší vyhodnocení sestrojeny následující grafy:

A) Pro palivovou směs 50% káva / 50% dřevo

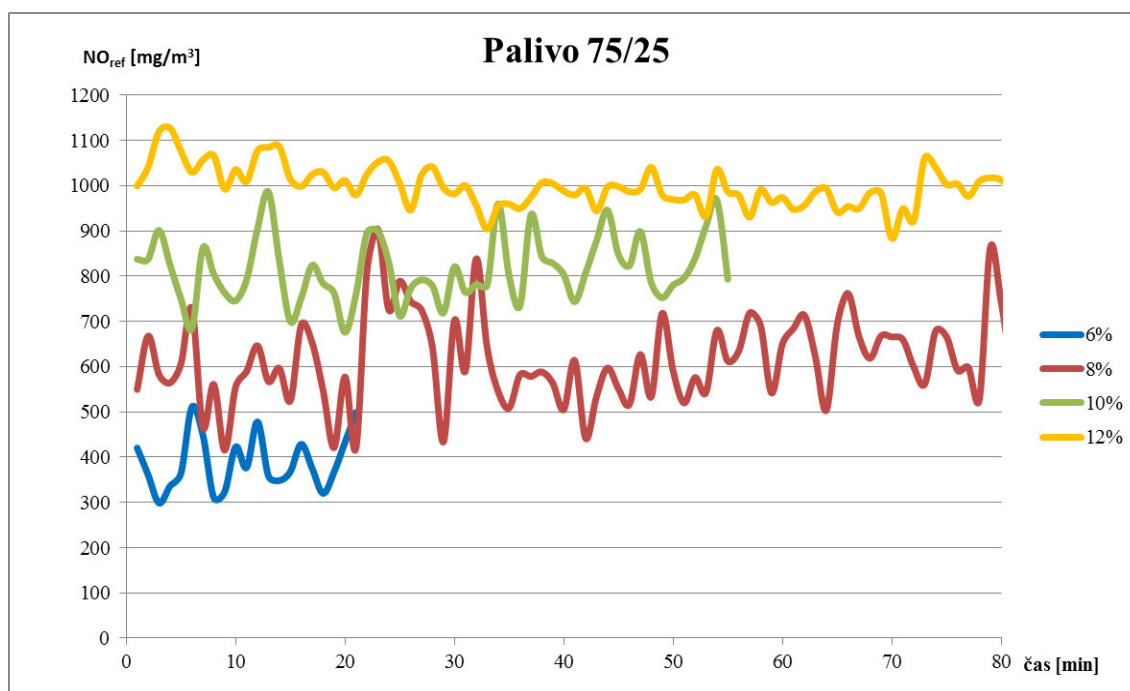


Obr. 30: Graf referenčních hodnot NO pro palivo 50/50

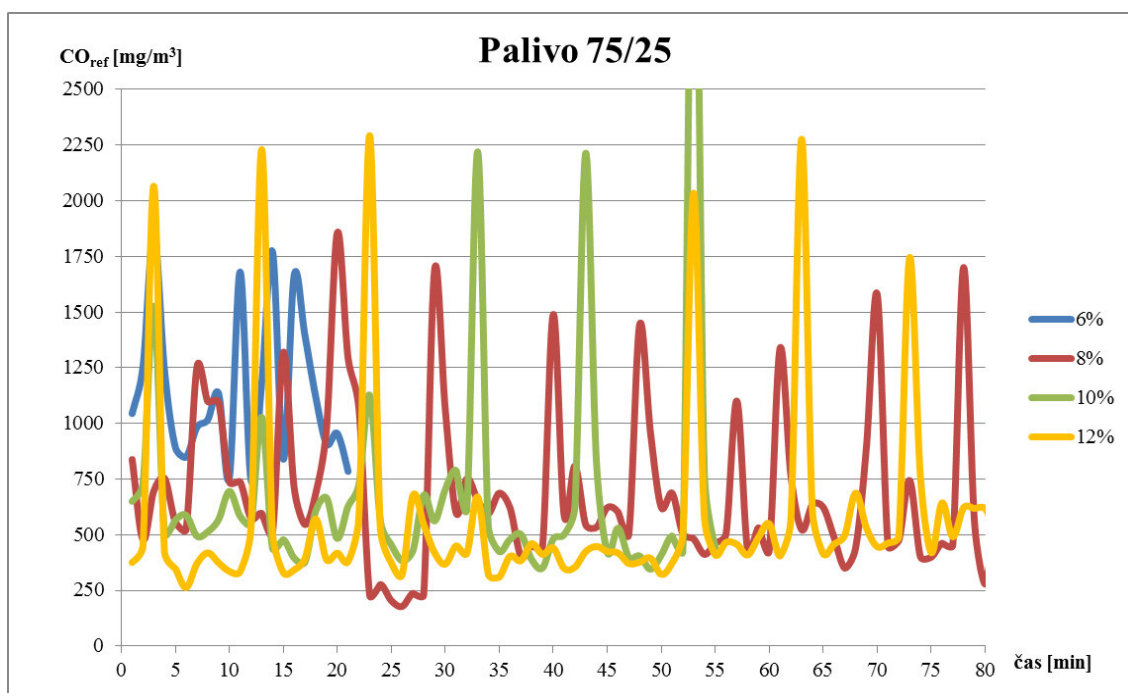


Obr. 31: Graf referenčních hodnot CO pro palivo 50/50

B) Pro palivovou směs 75% káva / 25% dřevo

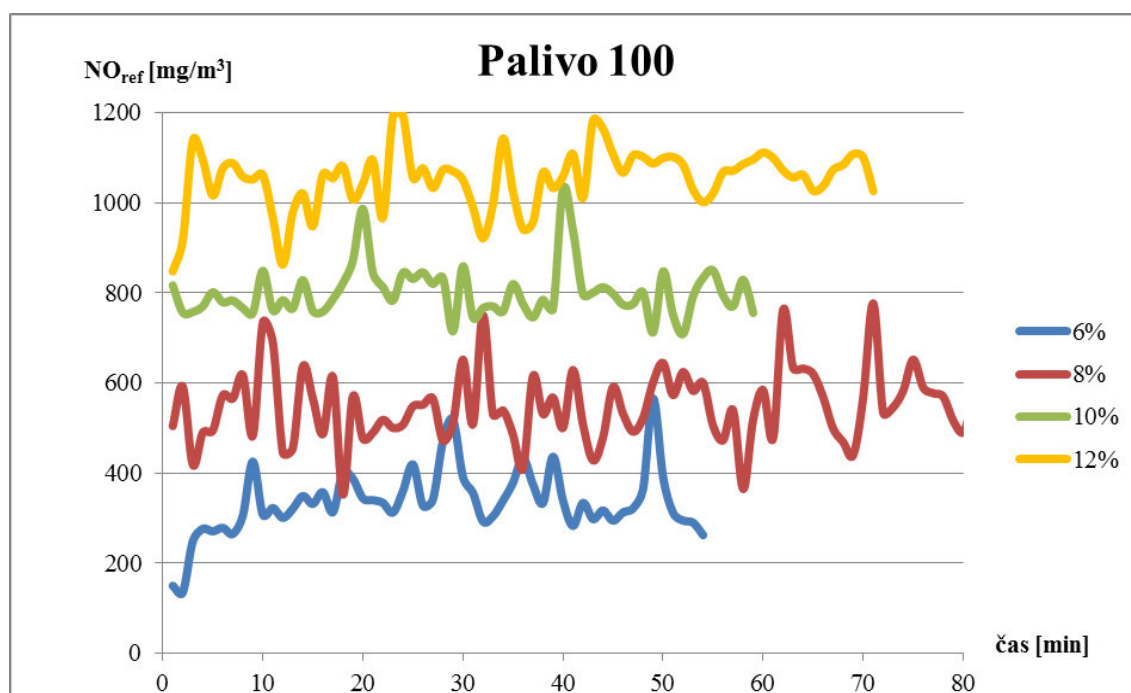


Obr. 32: Graf referenčních hodnot NO pro palivo 75/25

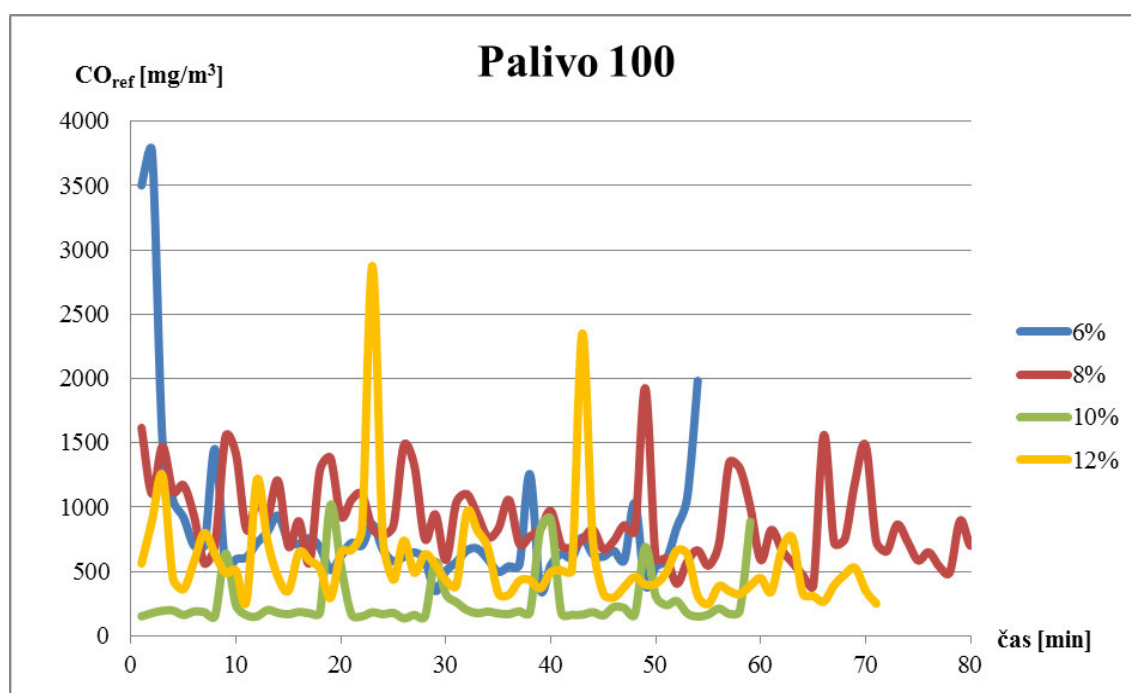


Obr. 33: Graf referenčních hodnot CO pro palivo 75/25

C) Pro čistou kávu

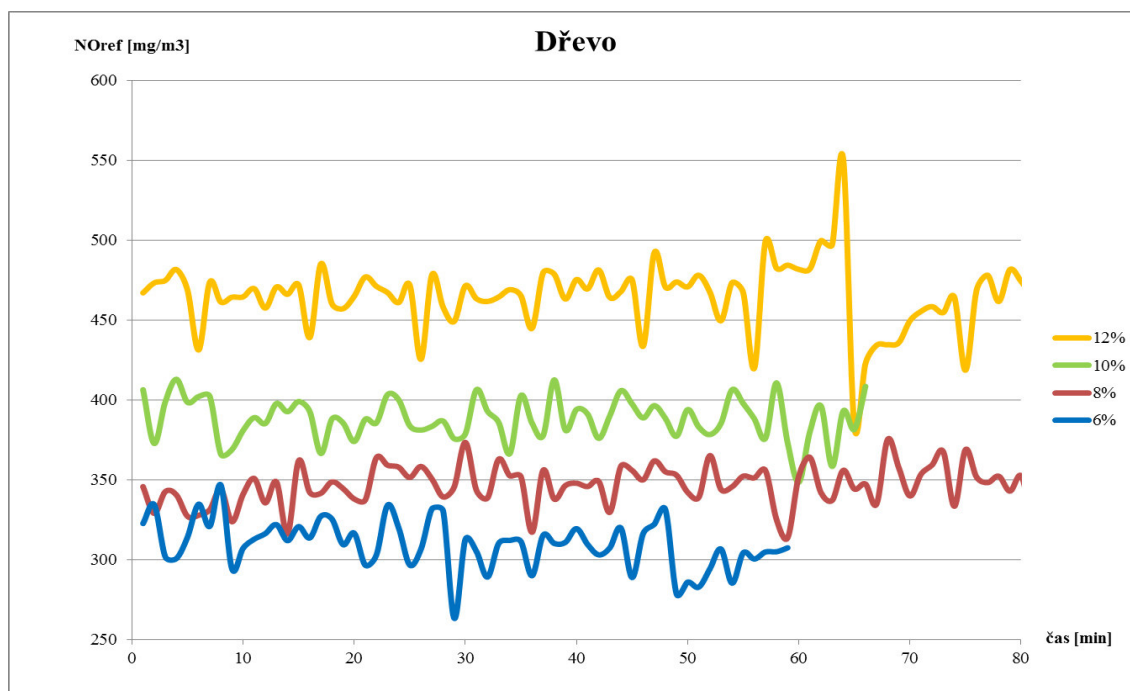


Obr. 34: Referenční hodnoty NO pro čistou kávu

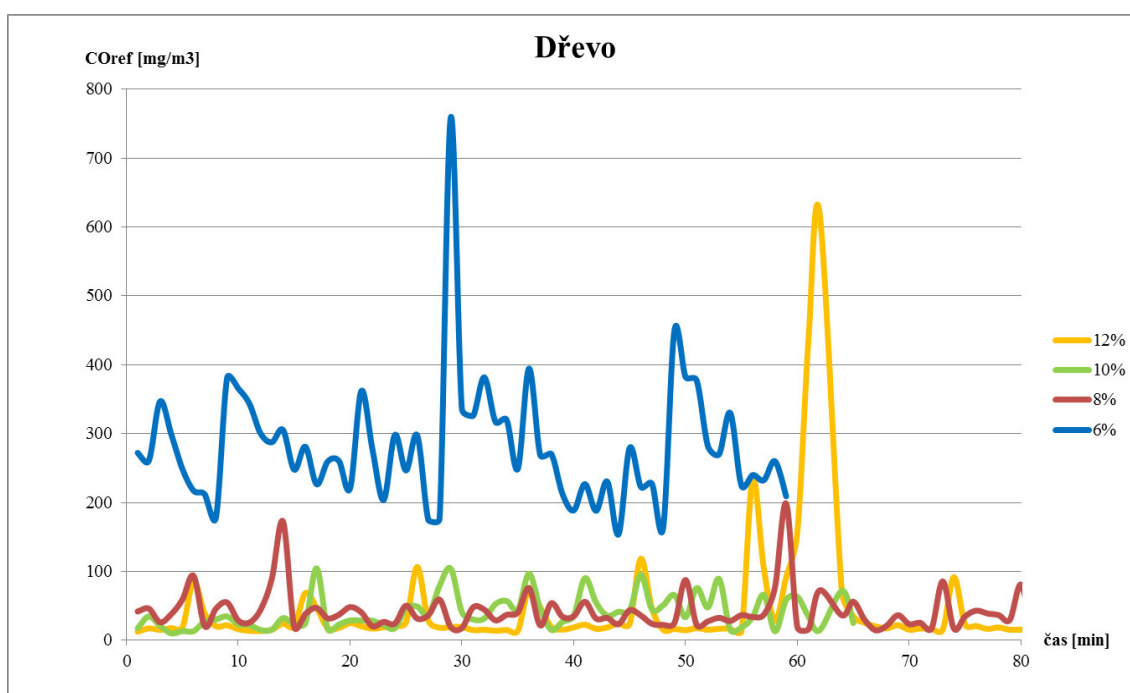


Obr. 35: Referenční hodnoty CO pro čistou kávu

D) Pro dřevo



Obr. 36: Referenční hodnoty NO pro dřevěné pelety



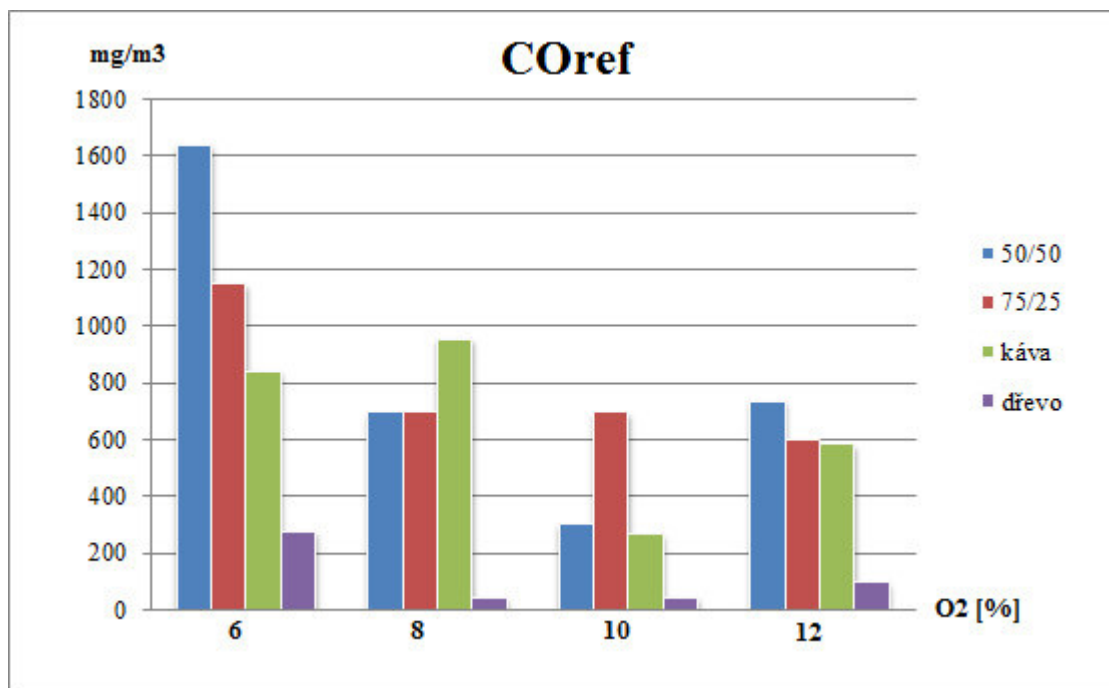
Obr. 37: Referenční hodnoty CO pro dřevěné pelety

Výsledné hodnoty z ustáleného měření byly zprůměrovány a následně byla vytvořena tabulka:

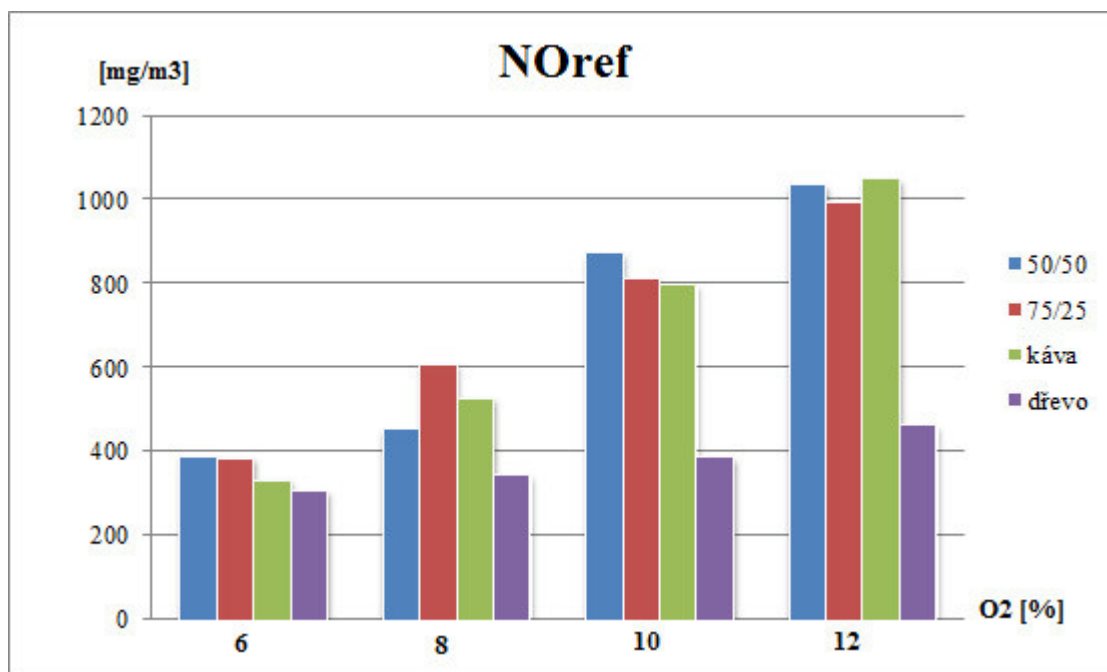
Tab. 6: Průměrné hodnoty z ustáleného měření

Palivo	Obsah O ₂ [%]	NO [mg/m ³]	NO _{referenční} [mg/m _n ³]	CO [mg/m ³]	CO _{referenční} [mg/m _n ³]	Teplota spalin [°C]
Dřevo	6,78	399,33	309,83	366,37	273,97	-
	7,89	413,04	346,71	48,73	40,31	202,72
	9,65	399,85	388,24	42,43	40,71	-
	12,48	359,52	464,83	50,65	92,14	-
50/50	6,43	514,98	392,86	222,78	1635,5	209,72
	7,71	549,77	455,11	835,87	691,95	214,39
	10,89	794,69	876,08	243,65	299,66	246,57
	13,03	736,28	1039,58	410,88	733,72	258,99
75/25	6,43	508,44	387,82	1533,12	1146,57	241,73
	9,2	656	611,73	746,16	695,81	222,59
	10,55	768,64	814,56	637	693,31	274,94
	12,96	727,77	997,96	423,52	594,98	273,57
Káva	6,3	440,51	335,53	1169,08	839,32	252,03
	8,03	625,88	530,89	1122,37	952,04	245,8
	11,34	700,35	800,67	227,82	264,87	266,64
	12,49	810,09	1052,9	440,27	580,01	297,63

Pro větší názornost byly z tabulky 6 vytvořeny dva grafy, které srovnávají množství CO_{ref} a NO_{ref} jednotlivých druhů paliv a kyslíků.



Obr. 38: Souhrnný graf CO_{REF}



Obr. 39: Souhrnný graf NO_{REF}

Spalování a množství přiváděného kyslíku bylo regulováno pomocí nastavení kotle, který byl přepnut do manuálního režimu. Mezi hlavní nastavované parametry patřily intenzita plnění [s], intenzita roštování [min], otáčky ventilátoru, plnicí dávka a škrtecí klapka, která byla většinu měření plně otevřena.

Hodnoty byly měřeny pro tři obsahy kyslíku O₂ a to pro 6%, 10% a 12%. Údaje uvedené u 8% O₂ byly použity z diplomové práce Ing. Daniela Sedláčka. Výsledné průměry hodnot kyslíku O₂ vyšly přibližně, jak bylo požadováno. Menší odchylky by pro názornost neměly vadit.

Množství vzduchu resp. kyslíku má výrazný vliv na průběh spalování. Při porovnání referenčních hodnot CO je zřejmé, že nejlepší výsledky, což znamená nejmenší množství, představují směs 50/50 a čistá káva pro přibližně 10% O₂. Přičemž obě hodnoty jsou skoro stejné. Nejhorších výsledků referenčních hodnot CO, neboli nejvyšší hodnoty, dosáhly směs 50/50 a 75/25 káva/dřevo pro 6% O₂, přičemž se výrazně snížila referenční hodnota NO.

Dle normy ČSN EN 303/5 (tab. 7) spadají hodnoty do kategorie 4. třídy paliv (do 1000 mg/m³) až na dvě skupiny hodnot – směs 50/50 pro 6% O₂ a pro směs 75/25 káva/dřevo pro 6% O₂. Dokonce hodnoty pro směs 50/50 (10,89% O₂) a čistou kávu (11,34% O₂) vyhovují kategorii 5. třídy paliv (do 500mg/m³), kam patří i dřevo.

Emisemi NO se norma ČSN EN 303/5 nezabývá, změna nastane v roce 2020, protože začne platit směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, která upravuje požadavky na Ekodesign kotlů na tuhá paliva. Zmíněná směrnice udává maximální koncentraci NO ve spalínách 200mg/m³ pro kotle do výkonu 0,5MW a pro referenční hodnotu kyslíku O₂ 10%. Těchto hodnot nedosahuje ani dřevo, proto lze předpokládat, že nově certifikované kotle budou muset projít konstrukční úpravou [13].

Tab. 7: Norma ČSN EN 303/5 – Mezní hodnoty emisí [15]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon	Mezní hodnoty emisí								
			CO			OGC			prach		
			mg/m ³ při 10% O ₂ ^a								
			kW	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída
			3	4	5	3	4	5	3 ^b	4	5
ruční	biopaliva	≤ 50	5 000	1 200	700	150	50	30	150	75	60
		> 50 ≤ 150	2 500			100			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			150		
	fosilní paliva	≤ 50	5 000			150			125		
		> 50 ≤ 150	2 500			100			125		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			125		
<u>samočinná</u>	<u>biopaliva</u>	<u>≤ 50</u>	3 000	<u>1 000</u>	500	100	30	20	150	60	40
		> 50 ≤ 150	2 500			80			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			150		
	fosilní paliva	≤ 50	3 000			100			125		
		> 50 ≤ 150	2 500			80			125		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			125		

POZNÁMKA 1 Hodnoty prachu v této tabulce vycházejí ze zkušeností s gravimetrickou filtrační metodou. Použitá metoda musí být uvedena v protokolu o zkoušce. Emise pevných částic, měřeno podle této evropské normy, nezahnuje kondenzovatelné organické látky, které mohou tvořit dodatečné pevné částice, když se spaliny smísí s okolním vzduchem. Hodnoty nejsou proto přímo srovnatelné s hodnotami naměřenými metodami s ředěním v tunelu, ani nemohou být přímo převedeny do koncentrací částic v okolním vzduchu.

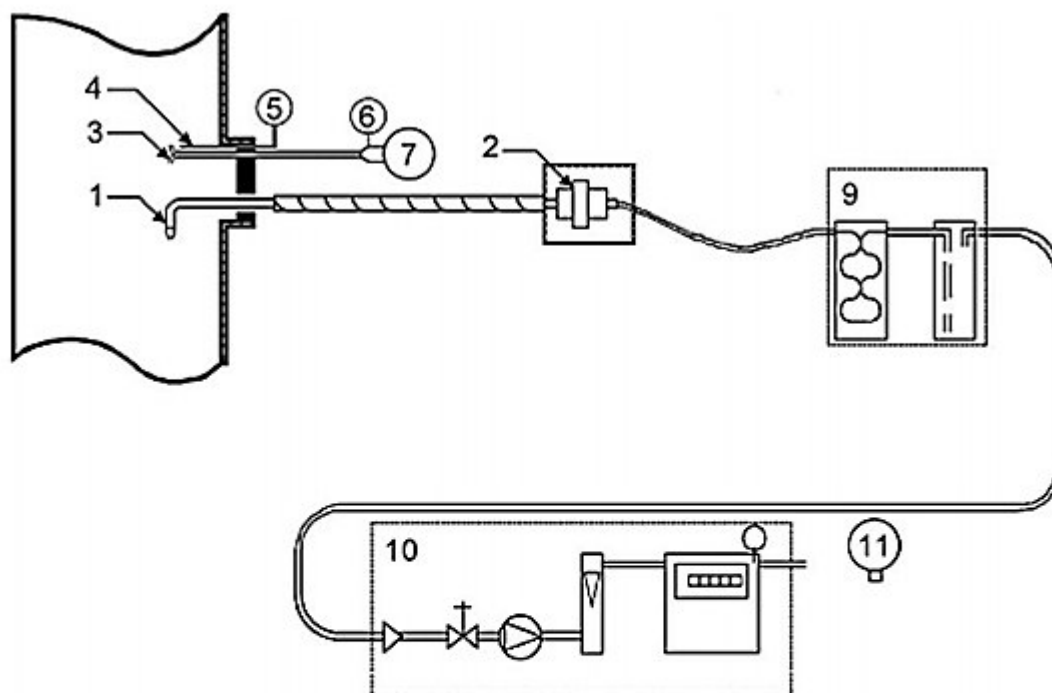
POZNÁMKA 2 Dodatečné zkušební metody a mezní hodnoty emisí, které platí v některých zemích, jsou uvedeny v odchylkách typu A v příloze C.

^a Vztahuje se k suchým spalinám, 0 °C, 1 013 mbar.

^b Kotle třídy 3 pro paliva typu E podle 1.2.1 nebo e-paliva podle 1.2.3 v této tabulce a označené klasifikací E-paliva a e-paliva nemusí splňovat požadavky na emise prachu. Skutečná hodnota musí být uvedena v technické dokumentaci a nesmí překročit 200 mg/m³ při 10% O₂.

V rámci zjišťování koncentrace škodlivin NO a CO bylo také provedeno měření tuhých znečišťujících látek TZL pomocí gravimetrické metody.

Tato metoda je manuální a jednorázová, odebírá se při ní vzorek z proudícího plynu v určitém časovém intervalu. Plyn prochází přes filtr a zvážení filtru dojde ke zjištění hmotnosti tuhých částic, které se na něm zachytily. Gravimetrickou metodu lze použít při koncentraci částic od 5 mg/m³ do 10g/m³ [17].



- | | | | |
|---|-------------------------|----|---|
| 1 | hubice sondy | 7 | měření diferenciálního tlaku |
| 2 | sestava filtru | 8 | chladicí a sušící zařízení |
| 3 | Prandtlova trubice | 9 | sací jednotka (z leva: uzavírací ventil, regulační ventil, čerpadlo, průtokoměr, plynoměr, měřidlo teploty) |
| 4 | teplotní čidlo | 10 | tlakoměr |
| 5 | měřidlo teploty | | |
| 6 | měření statického tlaku | | |

Obr. 40: Vzorkovací systém pro externí filtraci [16]

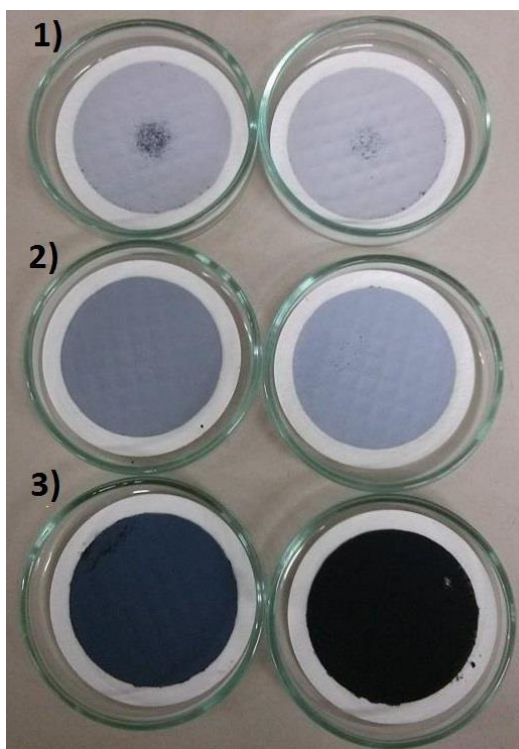
Měření TZL probíhalo pomocí speciální sondy, která byla umístěna v komíně, v této sondě byl vyměňován sběrný filtr. Pro každé palivo a každý obsah kyslíku O_2 byly provedeny alespoň dvě měření po 30 minutách. Vzhledem k nedostatečnému množství paliva nebylo možné tento čas dodržet u všech měření. Filtry před a po měření byly vyžehány v peci do 105°C , zváženy a zakonzervovány, aby nedocházelo ke změně váhy a vlhkosti.



Obr. 42: Váha na měření filtrů



Obr. 41: Žihací pec



Obr. 43: Příklad filtrů po měření (čistá káva,
1-12%O₂, 2-10%O₂, 3-6%O₂)

Pro každý vzorek byla měřena hmotnost filtru před a po měření, doba odběru, rychlost proudění v potrubí, průměr hubice, atmosférický tlak, teplota plynu v potrubí, statický tlak plynu v potrubí, medián koncentrace O₂, referenční koncentrace O₂, počáteční a konečný stav plynoměru a relativní vlhkost.

K určení koncentrace TZL došlo za provozních podmínek a normálních podmínek (vlhký plyn, suchý plyn) s přepočtem na referenční koncentraci kyslíku. K výpočtům sloužily vztahy dle normy ČSN EN 13284-1: [12]

- objem odebraného plynu pro suchý plyn a normální podmínky $V_{CSN} [m_N^3]$

$$V_{CSN} = V_{CS} \cdot \frac{p_a + p_c}{P_N} \cdot \frac{t_N}{(t_N + t_c)}$$

kde V_{CS} ... objem vzorku [m^3]

p_a ... atmosférický tlak [Pa]

p_c ... tlak plynu v plynoměru [Pa]

P_N ... absolutní tlak [Pa]

t_N ... absolutní nula [$^{\circ}C$]

t_c ... teplota plynu v plynoměru [$^{\circ}C$]

- objem odebraného plynu pro vlhký plyn a normální podmínky $V_{CN} [m_N^3]$

$$V_{CN} = \frac{V_{CSN}}{(1 - x_{H_2O})}$$

kde x_{H_2O} ... koncentrace H₂O ve vlhkém vzduchu [-]

- objem odebraného plynu za provozních podmínek V_C [m³]

$$V_C = V_{CN} \cdot \frac{t_N + t_s}{t_N} \cdot \frac{p_N}{(p_a + \Delta p_p)}$$

kde t_s ... teplota plynu v potrubí [°C]

Δp_p ... statický tlak plynu v potrubí [Pa]

- výpočet TZL za provozních podmínek C [mg·m⁻³]

$$C = \frac{m}{V_C}$$

kde m ... hmotnost TZL na filtru [mg]

- výpočet TZL pro vlhký plyn a normální podmínky C_N [mg·m_N⁻³]

$$C_N = \frac{m}{V_{CN}}$$

- výpočet TZL pro suchý plyn a normální podmínky C_{SN} [mg·m_N⁻³]

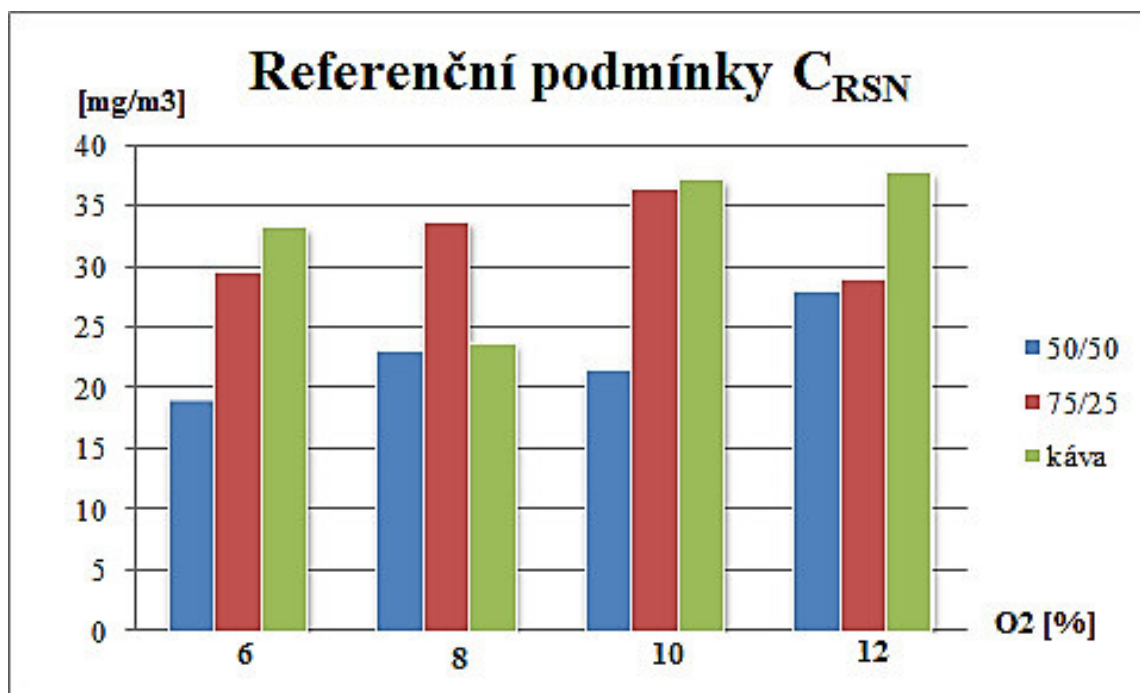
$$C_{SN} = \frac{m}{V_{CSN}}$$

Všechny naměřené hodnoty byly zprůměrovány a výpočty provedeny pomocí Microsoft Excel Office poté vznikla následující tabulka:

Tab. 8: Výsledky měření TZL

Palivo	Obsah O ₂ [%]	Koncentrace TZL			
		Provozní podmínky C [mg/m ³]	Vlhké normální podmínky C_N [mg/m _N ³]	Suché normální podmínky C_{SN} [mg/m _N ³]	Referenční podmínky C_{RSN} [mg/m _N ³]
50/50	6,43	117,65	21,5	20,35	19,05
	7,71	8,3	14,8	28,3	23,3
	10,89	71,4	14,1	19,6	21,6
	13,03	71,9	14,5	22,1	28,1
75/25	6,43	150,6	29,4	39,9	29,6
	9,2	9,8	17,6	36,4	33,9
	10,55	104,6	21,65	35,3	36,65
	12,96	65,15	13,5	21,9	29,2
Káva	6,3	155,2	30,85	44,3	33,35
	8,03	9,9	18,9	25,8	23,8
	11,34	100,95	20,65	33	37,35
	12,49	66,85	14,45	28,95	37,95

V tabulce nejsou obsaženy hodnoty TZL pro dřevěné pelety z důvodů absence naměřených hodnot, které nebyly součástí měření této bakalářské práce. Pro větší názornost byl vytvořen graf, který srovnává referenční podmínky C_{RSN} pro všechna paliva a kyslíky.



Obr. 44: Souhrnný graf TZL pro referenční podmínky

Z grafu nebo tabulky lze říct, že všechna měření kávových pelet náleží do kategorie paliv 5. třídy (do 40 mg/m³) dle tabulky 7.

Z hlediska tuhých polétavých částic spadá kávová sedlina do kategorie nejšetrnějších biopaliv, což se nezmění ani s novou normou pro Ekodesign, kde limitní hodnota TZL zůstane stejná [13].

6 Závěr

V současné době se stále více do podvědomí dostávají informace o alternativních obnovitelných zdrojích energie. Důvodem jsou snižující se zásoba fosilních paliv, která by měla být vyčerpána v následujících letech, rychle rostoucí cena těchto paliv a stále častěji objevující se zprávy o negativním dopadu fosilních paliv na životní prostředí. K těmto alternativním palivům se řadí především biomasa, kam patří i kávová sedlina [17, 18].

Cílem této bakalářské práce bylo zpracovat rešerši energetických vlastností kávy, provést spalovací zkoušky pelet z kávové sedliny a výsledky porovnat se spalováním dřevěných pelet.

Práce je rozdělena na tři hlavní části. První část obsahuje rešerši na téma spalování obecně, kam patří i základní charakteristika a vlastnosti tuhých paliv. Druhá část je věnována kávě, kávové sedlině a možnému využití tohoto materiálu. Poslední část je věnována experimentu neboli popisu uskutečněné spalovací zkoušky.

Pro přehlednost byla ze všech zjištěných dat vytvořena následující tabulka:

Palivo	Obsah kyslíku O ₂ [%]	NO _{ref} referenční [mg/m _N ³]	CO _{ref} referenční [mg/m _N ³]	Teplota spalin [°C]	TZL, referenční podm. C _{RSN} [mg/m _N ³]
50/50	6,43	392,86	1635,5	209,72	19,05
	7,71	455,11	691,95	214,39	23,3
	10,89	876,08	299,66	246,57	21,6
	13,03	1039,58	733,72	258,99	28,1
75/25	6,43	387,82	1146,57	241,73	29,6
	9,2	611,73	695,81	222,59	33,9
	10,55	814,56	693,31	274,94	36,65
	12,96	997,96	594,98	273,57	29,2
káva	6,3	335,53	839,32	252,03	33,35
	8,03	530,89	952,04	245,8	23,8
	11,34	800,67	264,87	266,64	37,35
	12,49	1052,9	580,01	297,63	37,95
dřevo	6,78	309,83	273,97	-	-
	7,89	346,71	40,31	202,72	8,5
	9,65	388,24	40,71	-	-
	12,48	464,83	92,14	-	-

Ačkoliv jsou hodnoty emisí CO_{ref} i prachu pro kávu vyšší než pro dřevěné pelety, najde se u každého paliva kombinace nastavení takové, že dle normy ČSN EN 303/5 spadá do kategorie paliv 4. třídy, u prachu dokonce i do 5. třídy. Jako neoptimálnější se jeví nastavení kotle pro přísun přibližně 10%-12% O₂. Dle výsledků by se dalo říct, že každé palivo vyžaduje jiné nastavení, tak aby dosahovala nejmenších hodnot CO_{ref} a množství prachu. Pro palivo 50% káva/50% dřevo by to bylo 10% O₂, pro 75% káva/ 25% dřevo 12% O₂ a pro čistou kávu vyšlo neoptimálnější nastavení 8% O₂.

Spalování kávových pelet splnilo základní spalovací podmínku a to, že při zvyšujícím se obsahu kyslíku O₂ se snižuje množství emisí CO a zvyšuje se množství NO. U hodnot paliv 50% káva/ 50% dřevo a u čisté kávy je zřejmé, že 12% O₂ je moc, dochází k ochlazení a spalování neprobíhá optimálně.

Pro lepší výsledky by bylo třeba provést zkoušky na jiném kotli, jelikož kotel Verner A251 spadá do 3. třídy a proto není příliš ekologický.

Seznam použitých zdrojů

- [1] SKÁLA, Zdeněk. *Termokinetika spalování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
- [2] KNORRE, Georgij Fedorovič. *Pochody spalování: určeno provozním inženýrům, konstruktérům a vysokoškolským studentům energetického zaměření*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956. Řada energetické literatury. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:2de94e20-5b1d-11e2-8f49-005056827e51>
- [3] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-3955-9.
- [4] Ksicht. *Seriál o detektivní chemii - Příběhy žáru a výbuchů* [online]. 2007 [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <http://ksicht.natur.cuni.cz/serialy/detektivni-chemie/4>
- [5] TZB-info. *O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích* [online]. 2012 [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/8644-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-2>
- [6] Vítejte na Zemi. *Výroba elektrické energie* [online]. 2013 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: http://vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=vyroba_elektricke_energie&site=energie
- [7] TZB-info. *Kotle-1. část* [online]. 2012 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/8382-kotle-1-cast>
- [8] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:cd550b90-e809-11e4-9f58-005056827e52>
- [9] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. *Biomasa pro výrobu energie*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.
- [10] OCHODEK Tadeáš, KOLONIČNÝ Jan a JANÁSEK Pavel. *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy: studie v rámci projektu Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006, 185 s. ISBN 80-248-1207-X.
- [11] Vítejte na Zemi. *Biopaliva* [online]. 2013 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=biopaliva&site=doprava>
- [12] ČSN EN 13284-1: *Stacionární zdroje emisí - Stanovení nízkých koncentrací prachu - Manuální gravimetrická metoda*. Praha: ČNI, 2002.
- [13] SEDLÁČEK, D. *Analýza energetického využití kávových pelet*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [14] Návod na obsluhu a instalaci automatického kotle VERNER A251, 44s. ,č.v. b026.66200.010311, vydáno 01.03.2011

- [15] ČSN EN 303-5: *Kotle pro ústřední vytápění – Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW – Terminologie, požadavky, zkoušení a značení*, TZ: 075303. Praha, ČSN, 2013.
- [16] Sciencedirect –ZUORRO Antonio, LAVECCHIA Roberto. *Spent coffee grounds as a valuable source of phenolic compounds and bioenergy*. [online]. [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611005117>
- [17] Sciencedirect – JEGUIRIM M., LIMOUSY L., DUTOURNIE P. *Pyrolysis kinetics and physicochemical properties of agropellets produced from spent ground coffee blended with conventional biomass*. [online]. [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876214001944>
- [18] Sciencedirect – AL-HAMAMREA Zayed, FOERSTERB Sascha, HARTMANNB Franziska, KÖGERB Michael, KALTSCHMITT Martin. *Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing*. [online]. [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236112000464>
- [19] Studie v rámci MATERIALS RESEARCH CENTRE – OBRUČA Stanislav, BENEŠOVÁ Pavla, PETRIK Siniša, KUČERA Dan, MÁROVÁ Ivana. *Biotechnological conversion of spent coffee grounds into polyhydroxyalkanoates*. Faculty of Chemistry, Brno University of Technology, Czech Republic

Seznam použitých zkratk a symbolů

ICO		International Coffee Organization
GAE		ekvivalent kyseliny galové na gram
TGA		termogravimetrická analýza
TZL		tuhé znečišťující látky
SCG		kávová sedlina
A^r	[%]	poměrný obsah popeloviny v palivu
C	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$	TZL za provozních podmínek
C_N	$[\text{mg} \cdot \text{m}_N^{-3}]$	TZL pro vlhký plyn a normální podmínky
C_{SN}	$[\text{mg} \cdot \text{m}_N^{-3}]$	TZL pro suchý plyn a normální podmínky
G	[kg]	hmotnost paliva
h	[%]	poměrný obsah hořlaviny v palivu
m	[mg]	hmotnost TZL na filtru
p_A	[Pa]	atmosférický tlak
p_C	[Pa]	tlak plynu v plynoměru
p_N	[Pa]	absolutní tlak
Q_i^r	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	výhřevnost
Q_s	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	spalné teplo
r	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	výparné/kondenzační teplo vody
t_C	[°C]	teplota plynu v plynoměru
t_N	[°C]	teplota absolutní nuly
V	$[\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1}]$	vodní hodnota v kalorimetru
V_C	$[\text{m}^3]$	objem odebraného plynu za provozních podmínek
V_{CN}	$[\text{m}_N^3]$	objem odebraného plynu pro vlhký plyn za normálních podmínek
V_{CSN}	$[\text{m}_N^3]$	objem odebraného plynu pro suchý plyn za normálních podmínek
$V_{vz \min}$	$[\text{m}^3]$	objem vzduchu teoreticky potřebného
$V_{vz sk}$	$[\text{m}^3]$	objem vzduchu přivedeného do ohniště
W^r	[-]	obsah vody v palivu
X	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$	naměřená hodnota plynu
X_{REF}	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$	referenční hodnota plynu
y	[-]	součinitel překrytí dějů
α	[-]	součinitel přebytku vzduchu
Δp_p	[Pa]	statický tlak plynu v potrubí
τ_c	[s]	celková doba průběhu děje
τ_f	[s]	doba průběhu fyzikálního děje
τ_{ch}	[s]	doba průběhu chemického děje